



# Plaatsing als strategie voor een efficiëntere fosfaatbemesting

## 1. Literatuur en modelonderzoek

A.L. Smit, P. de Willigen & A.A. Pronk







# Plaatsing als strategie voor een efficiëntere fosfaatbemesting

## 1. Literatuur en modelonderzoek

A.L. Smit, P. de Willigen & A.A. Pronk

© 2009 Wageningen, Plant Research International B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Plant Research International B.V.

Exemplaren van dit rapport kunnen bij de (eerste) auteur worden besteld. Bij toezending wordt een factuur toegevoegd; de kosten (incl. verzend- en administratiekosten) bedragen € 50 per exemplaar.

## **Plant Research International B.V.**

Adres : Droevendaalsesteeg 1, Wageningen  
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen  
Tel. : 0317 – 48 60 01  
Fax : 0317 – 41 80 94  
E-mail : [info.pri@wur.nl](mailto:info.pri@wur.nl)  
Internet : [www.pri.wur.nl](http://www.pri.wur.nl)

# Inhoudsopgave

	pagina
Samenvatting	1
1. Inleiding	3
2. Literatuuronderzoek	5
2.1 Aanleiding	5
2.2 Evenwichtsbemesting, de adviesbasis en de relatie met plaatsing	5
2.3 Literatuur	10
2.3.1 Plaatsing van N; al dan niet in combinatie met P en K	10
2.3.2 P	11
2.4 Conclusies en onderzoeksvraag	11
3. Modelonderzoek	13
3.1 Gebruikte modellen	13
3.1.1 Model voor 'lineaire gewassen'	13
3.1.2 Model LINTUL & Fussim voor 'exponentiële' gewassen	13
4. Resultaten	17
4.1 Lineaire gewassen	17
4.2 Exponentiële gewassen	19
4.2.1 Inleiding	19
4.2.2 Verloop P-opname per ha/dag en per lengte-eenheid wortel/dag	19
4.2.3 Effect van Pw	20
4.2.4 Effect van P-plaatsing	20
4.2.5 Efficiëntie van plaatsing	21
4.2.6 Interactie tussen Pw en plaatsing	22
4.2.7 Overige resultaten	24
4.2.8 Kanttekeningen bij de resultaten	24
5. Discussie	25
6. Literatuur	27
Bijlage I. Modelbeschrijving	1
Bijlage II. Modelkalibratie en initiatie	1
Bijlage III. Modelvalidatie	1



# Samenvatting

Fosfaatplaatsing is een bemestingsstrategie waarbij relatief kleine hoeveelheden fosfaat lokaal aangeboden worden in de nabijheid van plantenwortels. In het kader van strengere regelgeving (aanscherping van gebruiksnormen) is modelmatig onderzocht in hoeverre fosfaatplaatsing een mogelijkheid is om evenwichtsbemesting te realiseren. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen twee typen gewassen, kort groeiende gewassen die meestal in volle groei geoogst worden en gewassen met een langere groeiduur (waarbij plaatsing waarschijnlijk minder effect zal hebben). Bij de laatst genoemde gewassen is vooral de lineaire fase van de groei van belang. Met een relatief eenvoudig model is voor een aantal gewassen bekeken of in deze fase bij een bepaalde  $P_w$  de dagelijkse opname met de aanwezige wortellengte (literatuurgegevens) gerealiseerd kan worden.

Bij de kort groeiende gewassen werd plaatsing geanalyseerd met behulp van een dynamisch model. De modeluitkomsten gaven aan dat met plaatsing relatief kleine hoeveelheden fosfaat genoeg zijn om de gevraagde opname toch te realiseren. Ook gaven modelberekeningen aan dat een verhoging van de  $P_w$  van 25 naar 35 veel minder effectief is dan plaatsing, terwijl voor deze verhoging van de  $P_w$  vele malen meer fosfaat nodig zou zijn. Op basis van deze berekeningen lijkt plaatsing van fosfaat een strategie die bij zal kunnen dragen aan het realiseren van evenwichtsbemesting.





# 1. Inleiding

Bij de huidige mestregelgeving wordt uitgegaan van vaste hoeveelheden stikstof die per gewas aangewend mogen worden (de zogenaamde gebruiksnormen). Ook ten aanzien van de fosfaataanvoer worden beperkingen opgelegd waarbij geen onderscheid meer gemaakt wordt tussen organische mest en kunstmest (Anonymus, 2009). Genoemde beperkingen maken dat het meer dan voorheen zaak is om efficiënt met nutriënten om te gaan, zodat suboptimale bemestingen worden voorkomen. Dit laatste zal vooral voor groentebedrijven grote financiële consequenties hebben. Voor fosfaat is op termijn door de overheid als streven een evenwichtsbemesting genoemd waarbij aan- en afvoer van P met elkaar in balans moeten zijn, nog rekening houdend met onvermijdbare verliezen. Een van de maatregelen waardoor nutriënten beter benut kunnen worden is het *plaatsen* van meststoffen. Dit rapport evalueert het effect van plaatsing, enerzijds door een aantal literatuurdata op een rijtje te zetten. Anderzijds door modelmatig de effecten door te rekenen van het plaatsen van meststoffen bij zaaien en planten. Hierbij is in eerste instantie aandacht geschonken aan fosfaatplaatsing omdat hier de grootste effecten van verwacht kunnen worden (geringe mobiliteit van P in de bodem). In tweede instantie was ook voorzien om modelmatig te onderzoeken in hoeverre plaatsing van stikstof een positief effect op zal leveren. De perspectieven hiervan bleken echter minder interessant zodat in het huidige rapport voornamelijk aandacht aan P geschonken wordt. De indeling van dit rapport is als volgt. In hoofdstuk 2 wordt een algemene schets gegeven van de problematiek en aanleiding voor deze studie. Een en ander wordt geadstrueerd aan de hand van de Nederlandse bemestingspraktijk en op basis van literatuurgegevens in binnen- en buitenland. In hoofdstuk 3 worden de modelmatige berekeningen toegelicht. De resultaten verschijnen in hoofdstuk 4 terwijl het rapport afgesloten wordt met de discussie en conclusies in hoofdstuk 5.



## 2. Literatuuronderzoek

### 2.1 Aanleiding

In het Nederlandse Vierde Actieprogramma betreffende de nitraatrichtlijn (Anonymus, 2009) wordt het streven genoemd om te komen tot een P-evenwichtsbemesting (op bedrijfsniveau, eventueel op gewasniveau). Dat wil zeggen dat toekomstige gebruiksnormen beperkt worden tot de opname van het gewas plus een onvermijdelijk verlies van maximaal 5 kg fosfaat per hectare. Dit noopt tot bemestingsstrategieën waarmee efficiënter omgegaan wordt met P en waarmee P-verliezen (op termijn) worden tegengegaan.

Realisatie van evenwichtsbemesting kan echter op de bedrijven, zeker op bedrijven die gespecialiseerd zijn in bepaalde gewassen, conflicteren met de huidige P-adviezen. Op dit moment bestaat er een *gewasgericht* P-advies dat rekening houdt met de specifieke P-behoefte van het gewas en een *bodemgericht* advies dat streeft naar handhaving van de Pw in het traject 25/30-45. Het bodemgericht advies komt er op neer dat op bedrijfsniveau (gemiddeld over de rotatie) de P-afvoer + 20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 'onvermijdbaar verlies' gecompenseerd moet worden (Van Dijk, 2003).

De relatief hoge P-adviezen in de Nederlandse landbouw staan echter op gespannen voet met het streven naar evenwichtsbemesting (op bedrijfs- en nog sterker op gewasniveau). Bij een Pw aan de bovenkant van het streefwaardentraject wordt vaak nog een gewasgerichte P-bemesting geadviseerd. Ook bij nateelten wordt geadviseerd een P-bemesting te geven. Bij een Pw aan de onderkant van het streefwaardentraject worden ten opzichte van de onttrekking van het gewas hoge giften geadviseerd, in het bijzonder aan de groentegewassen. De vraag is dus enerzijds of de huidige P-advisering conflicteert met evenwichtsbemesting, en anderzijds of evenwichtsbemesting gerealiseerd kan worden zonder dat dit ten koste gaat van opbrengst en kwaliteit. Vooral bij een P-toestand aan de onderkant van het streeftraject zal de huidige advisering op termijn leiden tot overschotten en dus tot ophoping en/of emissies (afhankelijk van schaalniveau en bedrijfstype). Een en ander staat dan haaks op het streven naar evenwicht. Anderzijds wordt duidelijk dat vergeleken met de huidige praktijk P efficiënter benut zal moeten worden, hier lijkt de plaatsing van meststoffen vooral voor P een techniek om te besparen zonder aan opbrengst en kwaliteit in te boeten.

Naar verwachting zal bij een strengere regelgeving ten aanzien van de P-bemesting de fosfaattoestand van landbouwgronden op termijn dalen. De vraag die hierbij naar voren komt is welke gewassen of welke type gewassen hierbij het eerst in de problemen zullen komen.

### 2.2 Evenwichtsbemesting, de adviesbasis en de relatie met plaatsing

Bij het streven naar evenwichtsbemesting wordt er gemakshalve vanuit gegaan dat de hoogte van de geadviseerde P-bemesting goed correleert met de maximale P-inhoud van het te telen gewas (en liefst ook nog met de hoeveelheid afgevoerde P).

Kijkende naar de adviesbasis bestaat echter de indruk dat met name kortdurende teelten met een geringe P-afvoer gekoppeld zijn aan een naar verhouding hoge P-bemesting. Dit gevoegd bij het (ervarings)feit dat een P-gebrek voornamelijk in de eerste fasen van de groei zichtbaar wordt doet vermoeden dat vooral in het begin van de groei P een beperkende factor is.

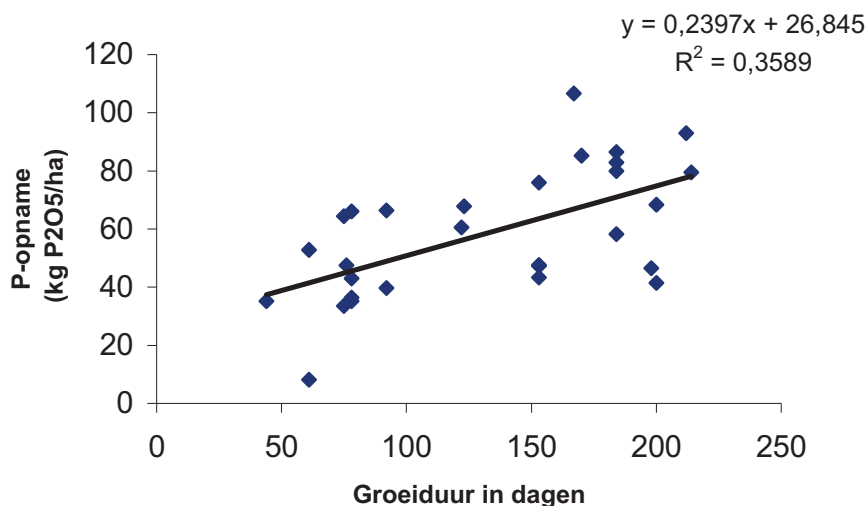
De relatie tussen P-bemesting en gewasonttrekking is nagegaan door gewasgericht te kijken naar het Padvies en de onttrekking bij 29 gewassen waarvan de gegevens gebruikt zijn bij een deskstudie naar de relatie tussen N-inhoud en N-advies (Smit & Van der Werf, 1992). Het betreft hier een reeks van gewassen (groenteteelt en akkerbouw) waar droge stof productie van hoofdproduct en restproduct bepaald is op basis van diverse 'grijze' literatuurgegevens. De opbrengsten zijn gekoppeld aan P-gehalten, aanwezig in de database Farm (Van Asperen, 1995), daarbij is een totale P-opname per gewas berekend (product + gewasresten). Voor alle gewassen was in voornoemde studie verder een gemiddelde zaai- en oogstdatum aangenomen zodat ook de groeiduur in dagen bekend is per gewas. Van elk gewas is een P-advies bepaald waarbij aangenomen is dat het gewas op zandgrond geteeld wordt bij een Pw van 30 (de onderkant van het streeftraject). Hierbij is gebruik gemaakt van de adviesbasis (Van Dijk, 2003). Bij het

gewasgerichte P-advies wordt een indeling gemaakt in 5 groepen, van groep 0 (zeer P-behoefstig) tot en met groep 4 (weinig P-behoefstig). Van groep 3 waren echter geen gewassen aanwezig in voornoemde publicatie. Tabel 1 geeft een overzicht van de gewassen.

Tabel 1. Deelnemende gewassen per fosfaatgroep.

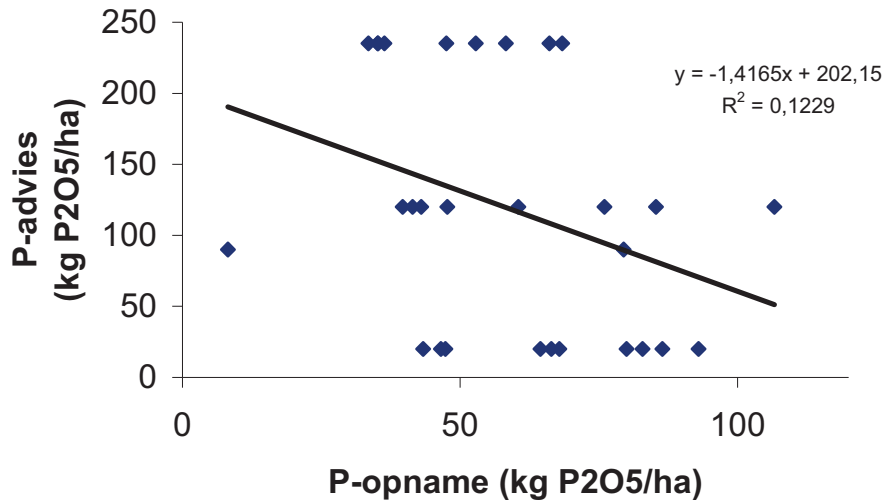
Groep 0 Zeer P-behoefstig	Groep 1	Groep 2	Groep 4 Weinig P-behoefstig
andijvie	aardappel	radijs	bloemkool
bospeen	doperwten	suikerbiet	boerenkool
Chinese kool	knolselderij		broccoli
knolvenkel	koolrabi		knollen
ijsbergsla	mâis (kuil)		prei
peen	sperziebonen		rode bieten
sla	spruitkool		rode kool
spinazie	ui		schorseneren
witlof			winter tarwe
			witte kool

De relatie tussen groeiduur en P-opname bij de verschillende gewassen is te zien in Figuur 1. Er is een redelijk verband: tussen lengte van de teeltperiode en de P-opname. Kort groeiende gewassen als radijs en spinazie nemen bijvoorbeeld resp. 9 en 35 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> op, terwijl gewassen met een lange groeiduur (rode kool, suikerbiet) meer dan 80 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> opnemen.



Figuur 1. Verband tussen gewasspecifieke P-opname en de gemiddelde groeiduur van het gewas.

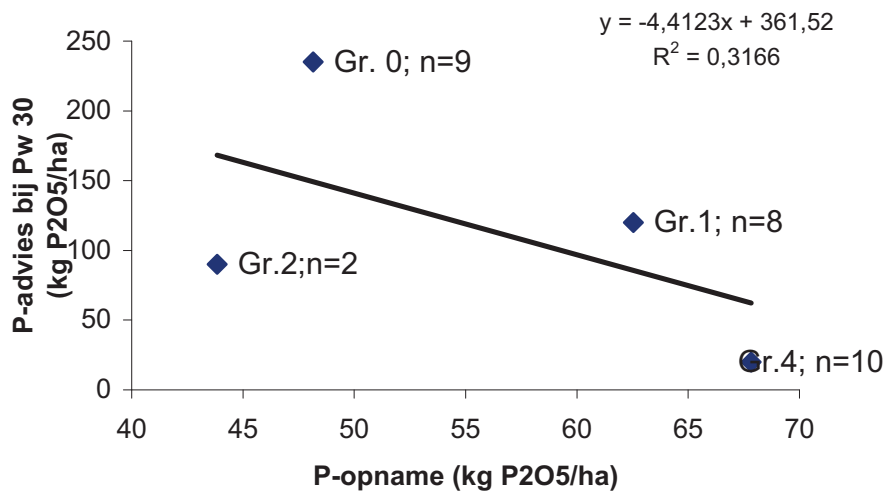
Is er nu ook een verband tussen P-opname en P-advies? Deze relatie is aanmerkelijk minder stevig en tendeert zelfs naar een negatief verband (meer P-opname geeft een lager advies, uitgaande van een P<sub>w</sub> van 30 (Figuur 2)).



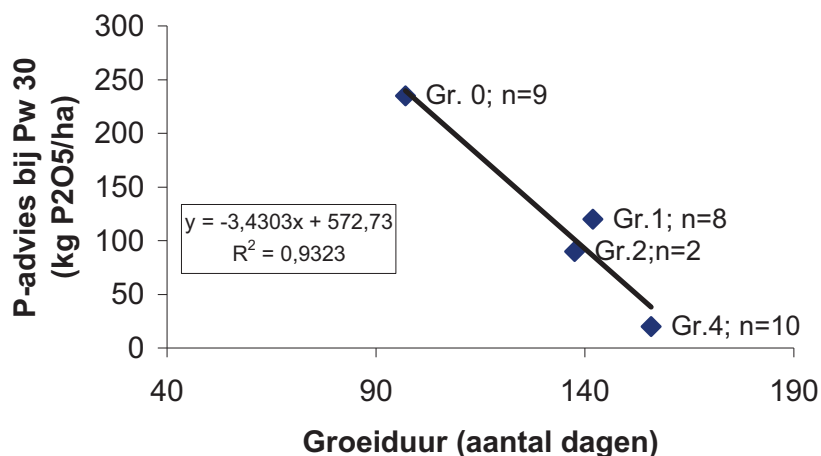
Figuur 2. Verband tussen P-opname en P-advies bij Pw 30.

Als alleen de gemiddelden per P-groep uitgezet worden dan wordt dit negatieve verband tussen hoogte van het P-advies en de P-onttrekking duidelijker zichtbaar (Figuur 3) evenals tussen P-advies en groeiduur (Figuur 4).

Met andere woorden: naarmate het gewas langer groeit, resp. meer P opneemt is het P-advies lager. Een paradox die het streven naar evenwichtsbemesting behoorlijk in de weg kan staan.



Figuur 3. Verband P-opname en P-advies bij Pw 30 (gemiddeld per P-groep; (n) aantal gewassen).

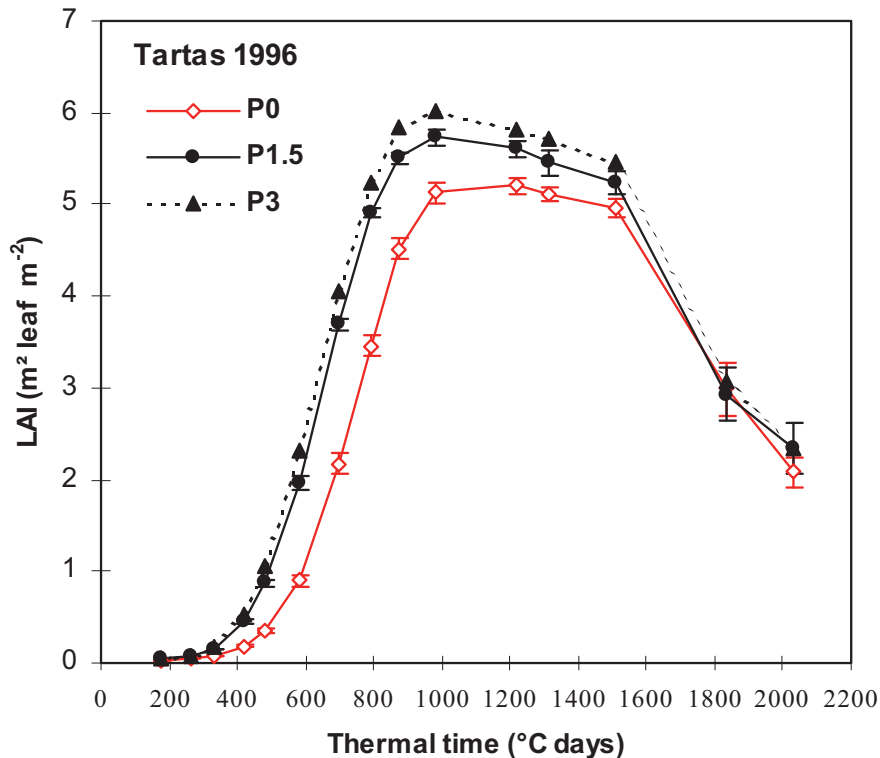


Figuur 4. Relatie tussen groeidiuur en het P-advies bij Pw 30 (gemiddeld per P-groep; n = aantal gewassen).

Deze negatieve relatie tussen P-advies en onttrekking/groeidiuur kan als volgt verklaard worden.

- Bij slecht wortelende gewassen en gewassen met een korte groeidiuur is vooral de beginfase cruciaal voor de P-opname. De P-opnamesnelheid is in die periode weliswaar laag maar er kan toch niet voldoende opgenomen worden vanwege het immobiele gedrag van het fosfaat in combinatie met het (nog) slecht ontwikkelde wortelstelsel. De potentiële opname van P is in dergelijke situaties laag, omdat die beperkt wordt door de geringe lengte van het wortelstelsel (De Willigen & Van Noordwijk, 1987). Ondanks het feit dat de vraag van het gewas in de beginfase gering is kan er toch sprake zijn van een onbalans tussen vraag en opnamecapaciteit. De negatieve effecten van een tijdelijk P-tekort worden vergroot door de korte groeidiuur, waardoor een achterstand opgelopen in de beginfase van grote invloed is op de uiteindelijke opbrengst.
- Gewassen die veel P opnemen (en dus vrijwel altijd met een langere groeidiuur) nemen de grootste hoeveelheid P op in een periode dat het wortelstelsel niet beperkend is voor de opname. In die periode kan zelfs bij wat lagere Pw aan de behoefte worden voldaan zonder bijbemesting. Frans onderzoek (bij INRA (Plénet *et al.*, 2000) en Alain Mollier, pers. comm.; zie Figuur 5) leert dat een (te) lage P bemesting bij maïs wel leidt tot een groeivertraging, maar dat die vertraging voornamelijk in de eerste 40 dagen na zaai opgelopen wordt. Daarna is de snelheid van ontwikkeling van het bladoppervlak onafhankelijk van de P-bemesting. Dit komt overeen met het bovenstaande: in de eerste fase van de groei is het wortelstelsel beperkend voor de opname (en zijn relatief hoge concentraties P nodig om de (geringe) opname te realiseren). Naarmate het gewas zich ontwikkelt wordt de wortellengte minder beperkend en kan ook bij een lagere P-vruchtbaarheid (of lagere P-input) aan de (hogere) gewasvraag worden voldaan.

Het lijkt er dus op dat een hoge P-vruchtbaarheid gerealiseerd moet worden om alleen de eerste fase van de groei te overbruggen. Hoewel een achterstand opgelopen in het begin ook voor gewassen met een langere groeidiuur opbrengstreducties tot gevolg zal hebben, zal dit naar verhouding minder dramatisch zijn dan bij kort groeiende gewassen. Ook zijn er omstandigheden die er voor kunnen zorgen dat het verschil weer gedeeltelijk ingelopen kan worden, bijvoorbeeld als de hoeveelheid water de opbrengstbepalende factor is of als er verschillen in ontwikkelingssnelheid optreden (later afrijpen of latere bloei waardoor als het ware het groeiseizoen weer wat verlengd wordt).



Figuur 5. Effect van P-bemesting op de LAI bij maïs ((Plénet et al., 2000) en Alain Mollier, INRA). P0, P1.5 en P3 zijn oplopende fosfaatgiften, resp. 0, 52 en 111 kg P/ha.

- De huidige P-adviezen zijn voornamelijk gebaseerd op proeven waarin de bemesting volvelds gegeven is (Ehlert, 2000). Om een mogelijk P-tekort in de beginfase bij kortgroeïende gewassen uit te sluiten zal in dat geval meer dan evenredig (in relatie tot de onttrekking) bemest moeten worden om de P-concentratie bij de weinige wortels te verhogen. Dit kan een verklaring zijn voor het feit dat de P-adviezen in relatie tot de P-opname bij kortgroeïende gewassen aan de hoge kant zijn.

## De consequenties

Bij het streven naar P-evenwichtsbemesting zou de huidige advisering (zeker voor sommige bedrijfstypen) gewijzigd moeten worden om een ophoping in de bodem te voorkomen. Met name als er veel gewassen van groep 0 in het bouwplan voorkomen (groentebedrijven) zal dit het geval zijn. Lagere adviezen zullen echter gepaard moeten gaan met een betere P-benutting om opbrengst en kwaliteitsverlies te voorkomen.

De consequentie van de veronderstelling dat een hoge gift voornamelijk gegeven moet worden om de P-opname in de beginfase van de groei veilig te stellen is dat zeer geringe giften van P, mits geplaatst in de nabijheid van het wortelstelsel, de P-benutting van de bemesting sterk zouden kunnen verbeteren.

Het belang hiervan is duidelijk als we ook in aanmerking nemen dat:

- Ook P-behoefte gewassen waarschijnlijk in de toekomst bij een lagere P<sub>w</sub> geteeld moeten kunnen worden
- Grote besparing aan P-gift mogelijk zijn bij geplaatst toedienen in de beginfase waardoor makkelijker aan gebruiksnormen kan worden voldaan, en uitgespaarde fosfaat elders ingezet kan worden.
- P-voorraden eindig zijn (nog voldoende voor 60-130 jaar, afhankelijk van gebruik en efficiëntie van winning (Steen, 1998; Smit *et al.*, 2009). Ook dit maakt dat er in de toekomst zuiniger met P moet worden omgesprongen (Djodjic *et al.*, 2005).

Naast een beperkt literatuuronderzoek is in dit rapport modelmatig nagegaan in hoeverre plaatsing van P een oplossing is voor een beperking in de P-aanvoer.

## 2.3 Literatuur

In het kader van het opstellen van een P-advisering is ook in het verleden een literatuuronderzoek gedaan naar het effect van plaatsen bij verschillende vollegrondsgroentegewassen (Ehlert *et al.*, 2002). Als factoren die het effect van plaatsing positief kunnen beïnvloeden worden in dit rapport genoemd:

- lage P-toestand
- lage vochttoestand, lage temperatuur
- ruime plantafstand
- sterke P-vastlegging
- lage giften
- gewassen met een korte groeiduur en een hoge P-behoefte

Op basis van literatuuronderzoek bleken de volgende gewassen positief te reageren op plaatsing:

- augurk, kool, koolraap, kropsla, prinsessenboon, suikermaïs (bij lage P-toestand), peen, ijssla en zaaiui

Geen of een gering effect werd gevonden bij

- bloemkool, suikermaïs (hoge P-toestand); ijssla (lage P-toestand<sup>1</sup>)

In aanvulling op bovenstaand rapport is gekeken naar eventueel aanwezige andere en recentere literatuurgegevens.

### 2.3.1 Plaatsing van N; al dan niet in combinatie met P en K

Stone (1998) deed onderzoek naar injectie van vloeibare NPK 'starter' bemestingen geplaatst onder het zaad van verschillende groentegewassen. Het bleek de groei in de beginfase te stimuleren, en vaak werden bij de oogst meeropbrengsten gerealiseerd. Dit gebeurde zelfs op gronden met een hoge PK-vruchtbaarheid. Bij een lagere vruchtbaarheid bleken geringe hoeveelheden van de meststoffen de groei zodanig positief te kunnen beïnvloeden dat het verschil met bodems met een hoge bodemvruchtbaarheid gering of nihil was.

De auteurs stellen zelfs dat het alleen met plaatsing mogelijk is om gronden met lage bodemvruchtbaarheid op te tillen naar het niveau met een hoge bodemvruchtbaarheid.

Auteurs geven echter wel grenzen aan van bodemvruchtbaarheid waarboven het effect van startgiften e.d. gering zou zijn (een en ander is echter moeilijk te vertalen naar Nederlandse bodemvruchtbaarheidscijfers).

Meer recent heeft Ma (1999-2004; 2006) in Taiwan onderzoek uitgevoerd omtrent vloeibare starters in de groenteteelt (o.a. kool, tomaat, peper). De toediening van vloeibare starter van slechts 7 kg N, 6 kg P en 6 kg K was voldoende om 30-50% van de anorganische bemesting en 50% van de organische meststof te vervangen. De starteroplossing werd in een zodanige concentratie bereid dat 50 ml per plant werd toegediend, onmiddellijk na planten of op verschillende tijdstippen na planten (tot maximaal 72 dagen). Ook een gunstig effect op mineraal N na oogst werd gevonden, waardoor mogelijke uitspoeling beperkt bleef. De combinatie van een basis van organische mest (kippenmest of compost) + starter en vervolgens bijbemestingen met minerale stikstof bleek het meest efficiënt om maximale opbrengsten van kool, cherry-tomaat en chili-peper te realiseren. Sweet pepper bleek echter meer ontvankelijk voor een basisbemesting met minerale stikstof plus een starter oplossing.

Er werd geconcludeerd dat bemestingpraktijken gebaseerd op starteroplossingen in combinatie met organische en/of anorganische bronnen een verhoging te weeg brengen van de nutriëntenbenutting, en voorts een positief effect hebben op geldelijke opbrengst terwijl het risico op milieuproblemen vermindert.

Stone (2000) vermeldt dat breedwerpig gestrooide kunstmestgiften vooral inefficiënt zijn bij gewassen met een zeer ruime rij-afstand. Onderzoek met vloeibare starters, die vlak bij het zaad werden aangebracht, maakten duidelijk dat N in combinatie met P (in de vorm van ammoniumfosfaat) de vroege groei en de uiteindelijke opbrengst bij de gewassen sla en ui duidelijk verbeterde (bij uien kon dezelfde opbrengst bij een 50% input aan N gerealiseerd worden). Zonder fosfaat werd echter geen verbetering geconstateerd, een aanwijzing dat het gunstige effect van starters toch voornamelijk aan P toegeschreven moet worden.

<sup>1</sup> Lage P-toestand, maar 9 maanden voor de proef werd meer dan 1300 kg fosfaat toegediend.



Ammoniumfosfaat als starter in combinatie met breedwerpig N verhoogde in het algemeen de N-recovery waarbij opbrengsten behaald werden die alleen met veel meer N gerealiseerd konden worden bij breedwerpig bemesten. Plaatsing van P wordt gezien als een belangrijke maatregel om de N-input te verlagen terwijl opbrengst en kwaliteit behouden blijven.

Stone (2000) vervolgde met alleen ammoniumfosfaat-starters het onderzoek in ui, sla, maïs en suikerbiet. Ook in dit onderzoek verhoogde een vloeibare startbemesting bij of onder het zaad de eerste groei. In combinatie met gereduceerde giften werden opbrengsten behaald die overeen kwamen met opbrengsten die bij hogere breedwerpige giften geteeld werden met uitzondering van het gewas suikerbieten. Hoewel N bespaard wordt door startgiften wordt het gunstige effect vooral bij de fosfaatcomponent gelegd. De betere begingroei zou vervolgens een betere exploitatie van de bodem N kunnen bewerkstelligen.

Starters worden gezien als een duidelijke mogelijkheid om N-input te verlagen met behoud van opbrengst en kwaliteit. Bijbemesting in combinatie met starters bleken even effectief als eenmalige bemestingen.

De auteur noemt nog een bijkomend voordeel van starters: het is dan mogelijk om een N<sub>min</sub> monster dat normaal gesproken voor de teelt genomen werd geruime tijd uit te stellen tot op het moment van bijbemesten. Door uit te stellen wordt beter rekening gehouden met de mineralisatie uit gewasresten van een voorgaande teelt.

Wel moet hierbij opgemerkt worden dat dit alleen opgaat voor startgiften met alleen P. Als ook N met de startgift meegegeven wordt is de ervaring (proefbedrijf Meterik) dat latere bemonsteringen op N<sub>min</sub> in het profiel vaak onverwachte (hoge) uitslagen geven. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door de heterogeniteit die door plaatsing veroorzaakt wordt. Een veel intensievere bemonstering (meer monsters per ha) is dan noodzakelijk.

Het lijkt overigens de vraag of het N-besparende effect van starters ook onder Nederlandse omstandigheden (met in het algemeen een hoge P-vruchtbaarheid) op zal gaan.

### 2.3.2 P

Prummel & Barnau Sijthoff (1975) hebben in een iets verder verleden onderzoek gedaan naar rijenbemesting met P bij stamsla- en tuinbonen. Dit zijn gewassen die in het algemeen vrij sterk op een fosfaatbemesting reageren. De fosfaatmeststof werd in 1 of 2 banden ca. 5 cm naast en 2 à 3 cm dieper dan het zaad in de grond gebracht. De proeven werden bij een vrij lage P<sub>w</sub> (10-36) uitgevoerd waarbij het gewas sterk reageerde op de fosfaatbemesting. Rijenbemesting verhoogde de opbrengst in alle gevallen belangrijk meer dan een breedwerpige bemesting, zelfs bij de hoogste gift van 200 kg fosfaat per ha. Bij rijenbemesting werd een zelfde opbrengst verkregen met ongeveer 1/6 deel van de hoeveelheid meststof die bij breedwerpige bemesting nodig was. Bij granen en aardappelen bedraagt dit volgens de auteurs ongeveer de helft. Bij een hoger P<sub>w</sub> getal (46) echter reageerde het gewas niet op fosfaat, breedwerpig toegediend, en ook niet op rijenbemesting.

## 2.4 Conclusies en onderzoeksvraag

Uit het onderzoek komt duidelijk naar voren dat voor fosfaat de relatie tussen opname/afvoer en anderzijds de behoefte veel minder eenduidig is dan bij stikstof. Voor N gaat het in grote lijnen op dat gewassen met een hoge onttrekking ook een hoger N-advies hebben. Bij overbemesting (hogere bemesting dan het gewas kan opnemen) uit zich dit in emissies of een hogere N<sub>min</sub> na de oogst. Voor fosfaat gaat dit veel minder of helemaal niet op. Hogere bemestingen dan de onttrekking leiden, althans op niet P-verzadigde gronden, minder snel tot emissies omdat de bindingscapaciteit van de grond hoog is en er geen gasvormige verliezen plaatsvinden. Anderzijds is de relatie tussen onttrekking en behoefte niet aanwezig (wellicht is er zoals bovenstaand beschreven zelfs een negatieve relatie). De verklaring hiervoor kan gezocht worden in het belang van de beginfase van de groei waarbij een beperkt wortelstelsel de reden kan zijn om via een hoge P status van de grond de gewenste opname te realiseren. Plaatsing van fosfaatmeststoffen kan dan zeer efficiënt zijn. Het is echter zinvol om hierbij onderscheid te maken tussen twee typen gewassen:

A) Gewassen met een relatief korte groeiduur en lage P-opname waarbij het belangrijk is dat de eerste fase van de groei ongestoord verloopt. De groei van deze gewassen verloopt van zaai tot oogst meestal exponentieel. Tot deze

groep gewassen horen veel groente gewassen met hoge P-adviezen. Vooral deze gewassen lijken gebaat bij een plaatsing van P.

B) Gewassen die langer op het veld staan, en veel P opnemen. Deze gewassen hebben vaak een lager P-advies. Het lijkt erop alsof beperkingen in de P-opname vooral ontstaan in de lineaire fase van de groei. In deze fase, waarin een groot gedeelte van de totale opname wordt opgenomen) moet de actuele opnamesnelheid (bepaald door wortelingsdichtheid en de P-status) niet lager zijn dan de vraag van het gewas.

In het navolgende zullen we onderscheid maken tussen deze twee typen gewassen (gemakshalve **exponentiële** en **lineaire** gewassen genaamd).

De **exponentiële** gewassen worden geanalyseerd met een dynamisch simulatiemodel waarbij de eerste fase van de groei wordt doorgerekend. In het bijzonder voor deze gewassen zal plaatsing van P een voordeel op kunnen leveren. In dit rapport wordt modelmatig nagegaan welk effect van deze plaatsing verwacht mag worden<sup>2</sup>.

De **lineaire** gewassen worden geanalyseerd met een eenvoudiger model, hierbij worden de opname en de worteling gedurende een langere periode min of meer constant verondersteld. Voor deze gewassen wordt geanalyseerd de interactie tussen  $P_w$ , opnamesnelheid en wortelingsdichtheid. Bij een te verwachten lagere  $P_w$  in de toekomst kan hierbij een indicatie verkregen worden welke gewassen als eerste hiervan schade zullen ondervinden.

Samenvattend is de onderzoeksvraag: in het kader van toekomstige P-aanvoernormen (en de mogelijke differentiatie daarin) het modelmatig nagegaan of plaatsing van fosfaat een efficiëntere benutting van P mogelijk maakt waarbij tevens nagegaan wordt of een interactie te verwachten is met de P-status ( $P_w$ ) van de grond.

---

<sup>2</sup> Overigens wordt in de huidige P-advisering al uitgegaan van besparingen van 25-50%. Maar zelfs bij  $P_w$  45 wordt voor groep 0 gewassen 70 kg  $P_2O_5$  geadviseerd. De vraag is dan of wellicht nog grotere besparingen mogelijk zijn.

## 3. Modelonderzoek

### 3.1 Gebruikte modellen

Zoals in hoofdstuk 2.3 beschreven is wordt onderscheid gemaakt tussen 'exponentiële' en 'lineaire' gewassen waarbij ook de werkwijze verschillend is. Voor lineaire gewassen wordt alleen gekeken in hoeverre de dagelijkse opnamesnelheid in de lineaire fase gedekt kan worden door het aanbod. Voor exponentiële gewassen is gebruikt gemaakt van een dynamisch simulatiemodel.

#### 3.1.1 Model voor 'lineaire gewassen'

Evenals in het rapport van Ehlert & Van Wijk (2002) is gebruik gemaakt van een mechanistisch model voor P-opname zoals beschreven door van Noordwijk *et al.* (1990). Om dit model te gebruiken zijn een aantal gegevens nodig die in de lineaire fase van de groei relevant zijn:

- de opnamesnelheid per dag van P
- de P-adsorptie isotherm
- de veronderstelde bewortelingsdichtheid van het betreffende gewas

Hierbij zijn soms andere bewortelingsgegevens dan in de studie van Ehlert & Van Wijk (2002) gebruikt, tevens zijn de P-opnamecijfers geactualiseerd. Om te komen tot een P-opnamesnelheid moet de duur van de lineaire fase en de P-opname geschat worden voor elk gewas. Ook deze zaken zijn in sommige gevallen anders dan in de studie van Ehlert & Van Wijk (2002). Voor verschillende gewassen zijn weinig bewortelingsgegevens bepaald, waar dat wel gebeurd is is veelal sprake van een grote spreiding. Dit alles maakt de onzekerheid van uitspraken groter, er is een conservatieve/voorzichtige schatting gedaan.

#### 3.1.2 Model LINTUL & Fussim voor 'exponentiële' gewassen

Het gebruikte model bestaat in feite uit twee gekoppelde modellen: een Light INTerception and Utilisation model LINTUL (Van Ittersum *et al.*, 2003) voor de bovengrondse processen en een driedimensionaal waterbalans- en nutriëntenmodel FussimR (Heinen & De Willigen, 2001) voor de ondergrondse processen. Het bovengrondse model rekent de potentiële drogestofproductie en potentiële gewasverdamping uit op basis van straling, het bladoppervlak, een 'Light Use Efficiency' (LUE) en een 'Water Use Efficiency' (WUE). De actuele drogestofproductie en de actuele gewasverdamping worden vastgesteld nadat vanuit FussimR is aangegeven of aan de gestelde vraag kan worden voldaan. De actuele drogestofproductie wordt verdeeld over verschillende organen. Het model FussimR berekent het transport van water en nutriënten in het bodemprofiel en naar het wortelstelsel in een cilindrisch systeem. Beide modellen wisselen informatie uit, zie Pronk *et al.* (2005) voor een beknopte beschrijving. Het bovengrondse model levert bijv. informatie over de hoeveelheid drogestof die dagelijks naar het wortelstelsel gaat en FussimR rekent vervolgens uit hoeveel wortellengte uit deze drogestof wordt gevormd en hoe deze over het bodemprofiel wordt verdeeld. Het verloop van de beworteling is gesimuleerd via een diffusiemodel, waarbij droge stof getransformeerd wordt in wortellengte (De Willigen *et al.*, 2002).

In de modelbenadering is uitgegaan van een gewas dat in vierkantsverband geplant is. Aan een plant wordt een cilinder grond toegekend met een straal van de halve plantafstand (=rijafstand) en een hoogte van 1 m. De cilinder is in radiale richting verdeeld in 11 ringen en verticaal in lagen (Figuur 6). De plant staat in het middelpunt van de cirkel. De bovenste 30 cm van de grondcilinder is verdeeld in 6 lagen van 5 cm elk, de resterende 7 lagen hebben een dikte van 10 cm.

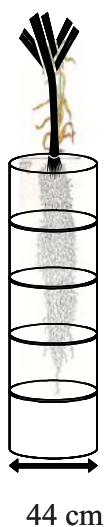
#### *Effect van P<sub>w</sub>*

P<sub>w</sub> werd in de bovenste 30 cm van het profiel gevarieerd, tussen de 10 en de 50. Dieper dan 30 cm werd een P<sub>w</sub> van 15 aangenomen.

*Plaatsing van P*

Plaatsing van P is gesimuleerd door fosfaat toe te dienen in een gering gedeelte van de bouwvoor (ca. 1% van het volume van de bovenste 30 cm in de laag 10-15 cm). De rest van het profiel werd tot 30 cm op  $P_w = 35$  of  $P_w 25$  gehouden; dieper dan 30 cm werd weer een  $P_w$  van 15 aangenomen. In 1% van het bodemvolume werd de  $P_w$  op 100, 200, 300, 400 en 500 gebracht, op hectare basis was de hoeveelheid P die hiermee gemoeid was gering, nl. respectievelijk 1.7, 4.1, 6.3, 8.4 en 10.8 kg P/ha.

Voor verschillende situaties en gewastypen werd op twee tijdstippen (30 en 75 dagen na planten) de gerealiseerde P-opname vergeleken met de vereiste opname. Vermeld moet nog worden dat er geen negatieve terugkoppeling van een niet gerealiseerde P-opname in het model is opgenomen, d.w.z. een P-tekort heeft in het model geen gevolgen voor de groei. Er wordt dus alleen gekeken of de gevraagde P-opname gerealiseerd kon worden en er worden geen uitspraken gedaan over mogelijke opbrengstderivingen. Stikstof was onder geen enkele omstandigheid beperkend.



*Figuur 6. Schematische voorstelling van de eerste vijf lagen van de cilinder grond.*

Tabel 2. Modelgewassen, zoals gedefinieerd door bewortelingsintensiteit en totale fosfaatopname. Indicatief is ook aangegeven welke gewassen in een bepaalde categorie kunnen passen.

Beworteling	kg P/ha		
	10	20	30
<b>+</b>	<b>C10R+</b> radijs sla (vroeg) radichio	<b>C20R+</b> ijsbergsla	prei
<b>++</b>	<b>C10R++</b> spinazie bospeen	<b>C20R++</b> knolvenkel kohlrabi sla andijvie	<b>C30R++</b> kroten Chin. kool
<b>+++</b>		<b>C20R+++</b> boerenkool	bloemkool broccoli

Het model is in eerste instantie gemaakt om het gewas prei door te rekenen over de hele teeltperiode. Later is het model gebruikt om specifiek in de eerste periode na planten het effect van plaatsing door te rekenen. Voor dit laatste zijn verschillende gewastypen nagebootst door enerzijds de bewortelingskarakteristiek en anderzijds de P-vraag te variëren (zie Tabel 2). Verschil in beworteling tussen de verschillende modelgewassen werd gerealiseerd door de worteldiffusieparameter te variëren (zie De Willigen *et al.*, 2002). De ingestelde parameters werden zodanig gekozen dat na 30 dagen groei de gerealiseerde wortellengtedichtheid 0.43, 0.48 en 1.72 cm. cm<sup>-3</sup> was bij resp. een zwakke (+) , matige (++) en sterke (+++) beworteling (zie Tabel 2).

De berekeningen werden uitgevoerd voor een geplant gewas van 50000 planten/ha, met een groeiduur van maximaal 75 dagen. Afhankelijk van het modelgewas moest in deze periode een opname van 10, 20 of 30 kg P/ha gerealiseerd worden. Om vooral de beginperiode te analyseren werd na 30 dagen groei beoordeeld in hoeverre de gevraagde P-opname kon worden gerealiseerd met het zich ontwikkelende wortelstelsel (lengte), en de concentratie van P in het bodemvocht (zoals bepaald door P<sub>w</sub> en de (al dan niet geplaatste) bemesting.

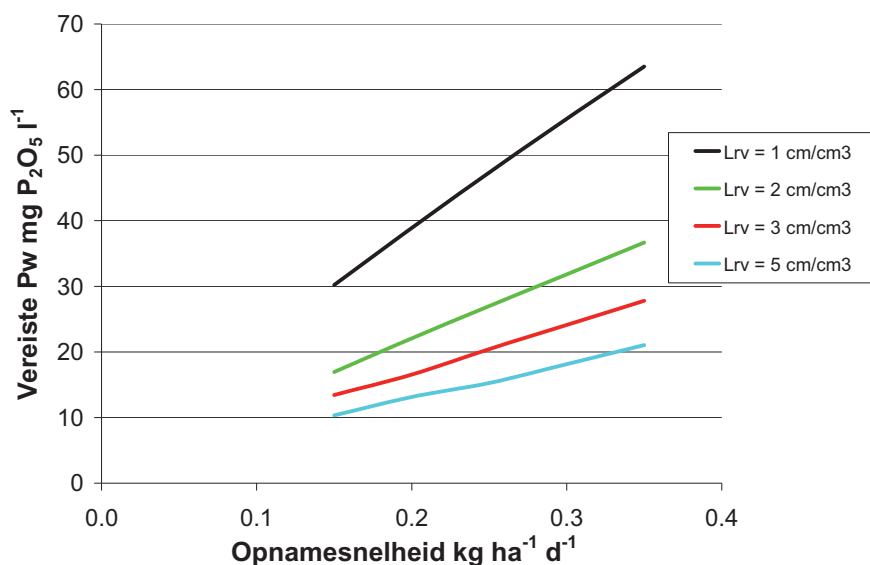
Voor meer informatie over het gebruikte model wordt verwezen naar Bijlage I, II en III.



## 4. Resultaten

### 4.1 Lineaire gewassen

Zoals aangegeven is in grote lijnen de werkwijze als in rapport Ehlert & Van Wijk (2002) gevolgd. Er zijn soms op basis van (recente) literatuurgegevens andere bewortelingskarakteristieken gebruikt, terwijl ook voor sommige gewassen P-opnames (Tabel 3), de duur van de lineaire fase en daarmee de P-opnamesnelheden iets anders zijn ingeschat.



Figuur 7. Verband tussen de P-opnamesnelheid (kg P ha<sup>-1</sup> dag<sup>-1</sup>) en de daarbij behorende vereiste Pw bij verschillende bewortelingsintensiteiten: 1, 2, 3 en 5 cm per cm<sup>3</sup>.

Tabel 3. Enige lineaire gewassen met hun arealen, en de (spreiding in) fosfaatopname (in kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>).

Gewas	Areaal (x 1000 ha)	Fosfaat Groep	Fosfaat-opname	
			Min	Max
wintertarwe	106	4	69	93
suikerbieten	103	2	60	79
zomergerst	52	3	38	41
aardappel	120	1	50	76
snijmaïs	217	1	46	64
zaaiuien	16	1	36	41
winterpeen	5	3	68	75
spruitkool	4	1		107
witlofwortel	4	3		58
bewaarkool	2	4		83
prei	3	4	40	43
schorseneren	1	4		47
knolselderij	1	1	85	85

Tabel 4. Worteldichtheid ( $L_{rv}$ ,  $cm\ cm^{-3}$ ), opnamesnelheid (min/max,  $kg\ P\ ha^{-1}\ d^{-1}$ ) in de lineaire fase en de bijbehorende Pw voor ongestoorde groei.

Gewas	Fosfaat Groep	Wortels Lrv	P-opnamesnelheid $kg\ P/ha/dag$		Pw nodig voor ongestoorde opname	Volgens P-advies
			Min	Max		
wintertarwe	4	5-7	0,29	0,39	>35	>30
suikerbieten	2	1.5-2	0,24	0,32	>50	>50
zomergerst	3	6-7	0,22	0,24	>15	>40
aardappel	1	1.5-1.6	0,27	0,41	>55	>60
snijmaïs	1	2-2.5	0,26	0,34	>35	>60
zaaiuien	1	1.8	0,17	0,20	>40	>60
winterpeen	3	1-2.3	0,24	0,26	>40-55	>60
spruitkool	1	4-7	0,31	0,31	>30	>60
witlofwortel	3	2.2	0,33	0,33	>45-50	>40
bewaarkool	4	2.2	0,29	0,29	>35	>35
prei	4	0.5-1.5	0,19	0,20	>55	>30
schorseneren	4	?	0,15	0,15	?	>30
knolselderij	1	?	0,62	0,62	?	>60

Gegeven een bepaalde opnamesnelheid in de lineaire fase (Tabel 4) is het met Figuur 7 (de uitkomst van het gebruikte model) mogelijk om de vereiste Pw voor ongestoorde groei af te lezen (hierbij is een schatting aan de veilige kant gemaakt). Deze Pw is weergegeven in de een na laatste kolom van Tabel 4. In de laatste kolom van deze tabel is de Pw weergegeven waarbij in de huidige adviesbasis geen bemesting wordt geadviseerd.

Deze laatste Pw is in veel gevallen wat hoger dan de Pw op basis van het model, wat impliceert dat bij het volgen van de adviesbasis sneller een P-bemesting wordt geadviseerd. Bij het opstellen van de adviesbasis zal wellicht ook een zekere mate van risicomijding een rol hebben gespeeld.

Uitzondering zijn de gewassen prei en witlof die op basis van het model P-gevoeliger geacht worden dan de adviesbasis. Omgekeerd is er een vrij groot verschil met de adviesbasis voor de gewassen spruitkool en zomergerst (deze worden in de adviesbasis P-gevoeliger geacht dan in het model).

Ervaringen in de praktijk zijn soms wisselend. Recent werd vastgesteld dat bij Pw 45 geen enkel gewas een reactie op een P-bemesting vertoonde (pers. comm. Peter Dekker). Aan de andere kant werd op proefbedrijf Vredepeel enkele jaren geleden vastgesteld dat plaatsing van P bij prei effect had.

De uitkomsten van het model geven dus een gunstiger situatie aan dan de adviesbasis (in het algemeen kan voor ongestoorde groei de Pw naar een iets lager niveau zakken dan de adviesbasis suggereert). Hierbij moet echter het volgende aangetekend worden:

- de relatie tussen Pw en bemesting in het model is 1 op 1; alle P is beschikbaar, er is geen fixatie enz. Dit is een veronderstelling die wellicht niet helemaal opgaat. Op basis van de adsorptie-isotherm kan berekend worden hoeveel fosfaat nodig is om de Pw een bepaald aantal eenheden te verhogen. Deze hoeveelheid is met de gebruikte isotherm fors lager dan onder de adviesbasis vermeld wordt. Is dit het gevolg dat we alleen op korte termijn de zaken bekijken en zaken als fosfaatfixatie, vastlegging, kortom de hele fosfaatchemie op langere termijn buiten beschouwing laten? Het gevaar bestaat dan dat zaken te gunstig voorgesteld worden of dat anderzijds het advies wellicht te risicomijgend is. Risico's die wellicht te voorkomen zijn door jaarlijks (kleine) giften aan de gewassen te geven?
- alle wortels zijn (even) actief; met name onder droge omstandigheden zal dit niet altijd opgaan waardoor het model wellicht zaken te rooskleurig inschat (ondanks een conservatieve interpretatie).



## 4.2 Exponentiële gewassen

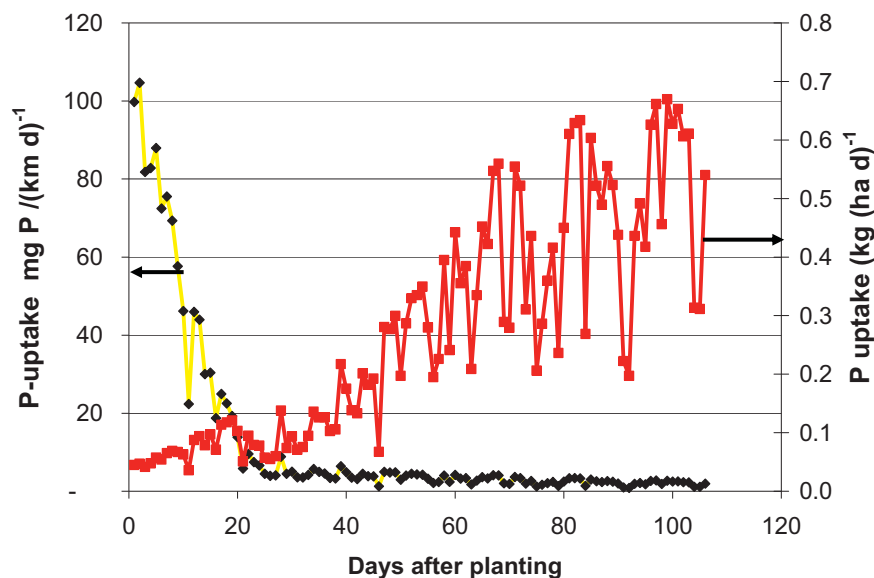
### 4.2.1 Inleiding

Ehlert & Van Wijk (2002) maakten bij gewassen geen onderscheid tussen lineaire en exponentiële gewassen en pasten de voorgaande werkwijze (kijken of bij een gegeven wortellengtedichtheid aan de (constant veronderstelde) vraag kan worden voldaan) op alle gewassen toe. Vooral bij kort groeiende gewassen echter is er sprake van een zich uitbreidend wortelstelsel in combinatie met een toenemende vraag, dit vraagt om een *dynamisch* simulatiemodel. Vooral omdat hier ook een effect van plaatsing mee te kwantificeren is.

Binnen het dynamische model wordt de P-opname berekend, hiervoor is o.a. het bewortelingsverloop en de P-opname curve in de tijd benodigd. Gegeven een bepaalde bewortelingsintensiteit en de P-concentratie in het bodemvocht kan uitgerekend worden in hoeverre en hoe lang aan de gewasvraag kan worden voldaan. Zoals eerder is opgemerkt (paragraaf 3.1.2) is er in het model geen terugkoppeling tussen groei en P-opname. In werkelijkheid zal met name het bladoppervlak zich bij P-gebrek minder snel ontwikkelen waardoor groeivertraging optreedt. In het kader van deze studie is echter alleen gekeken naar de relatie Pw, beworteling, gewasvraag (en het effect van plaatsing). De beoordeling vindt plaats door op bepaalde tijdstippen de hoeveelheid opgenomen P (de gerealiseerde P-opname) met de gewasbehoefte P te vergelijken.

### 4.2.2 Verloop P-opname per ha/dag en per lengte-eenheid wortel/dag

De vraag of het wortelstelsel inderdaad meer moet presteren in de eerste groeifasen is nagegaan door het de dagelijkse P-opname zowel in kg per ha per dag als per eenheid wortellengte te berekenen. De vereiste dagelijkse P-opname neemt na planten sterk toe met de tijd, analoog aan het verloop van de drogestoftoename (Figuur 8, rood, rechter as). Uitgedrukt per eenheid wortellengte echter is de opname maximaal aan het begin van de teelt periode, hier moeten de wortels dus het meest 'presteren', 8-10 keer zoveel als aan het einde van de teelt.



Figuur 8. Vereiste opname snelheid (rood, rechteras) en vereiste opname per lengte eenheid wortel (geel, linker as) als functie van de tijd (dagen na planten).

### 4.2.3 Effect van Pw

Allereerst is nagegaan voor alle modelgewassen in hoeverre bij een bepaalde Pw de gewenste P-opname gerealiseerd kan worden. Op twee tijdstippen (30 en 75 dagen) na planten is daarbij vergeleken de gerealiseerde met de gewenste P-opname bij een vijftal Pw waarden (10, 15, 25, 35 en 50). Figuur 9 geeft een voorbeeld voor modelgewas C10R++<sup>3</sup>, een goede beworteling en een gewasbehoefte van 10 kg P/ha. De horizontale lijnen in deze figuur laten de gewenste P-opname zien na 30 en 75 dagen. Hoewel bij een Pw >30 na 30 dagen de gewenste opname niet geheel gerealiseerd kon worden is dat wel het geval na 75 dagen.

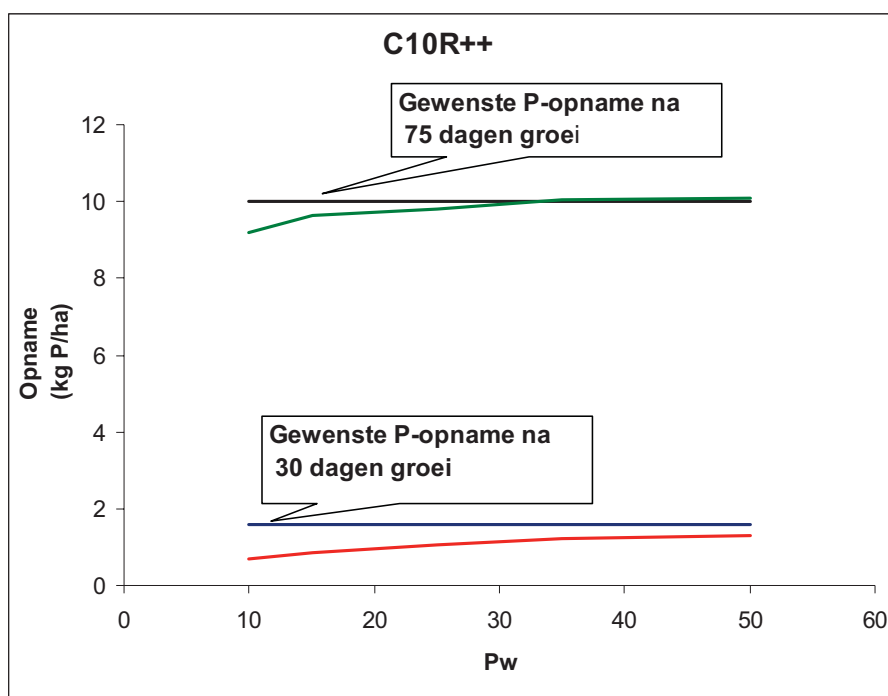
Voor het modelgewas C10R+ (geringere beworteling met dezelfde behoefte) kon de gewenste P-opname zelfs bij een Pw van 50 niet geheel gehaald worden. Bij de overige modelgewassen (met een behoefte van 20 en 30 kg P/ha) was dit ook in meer of mindere mate het geval.

Vooraf bij een gewasvraag van 20-30 kg P/ha zal een verlaging van de Pw tot 35 dus aanleiding geven tot een bijbemesting met fosfaat waarbij met de huidige adviezen een overschot zal ontstaan.

### 4.2.4 Effect van P-plaatsing

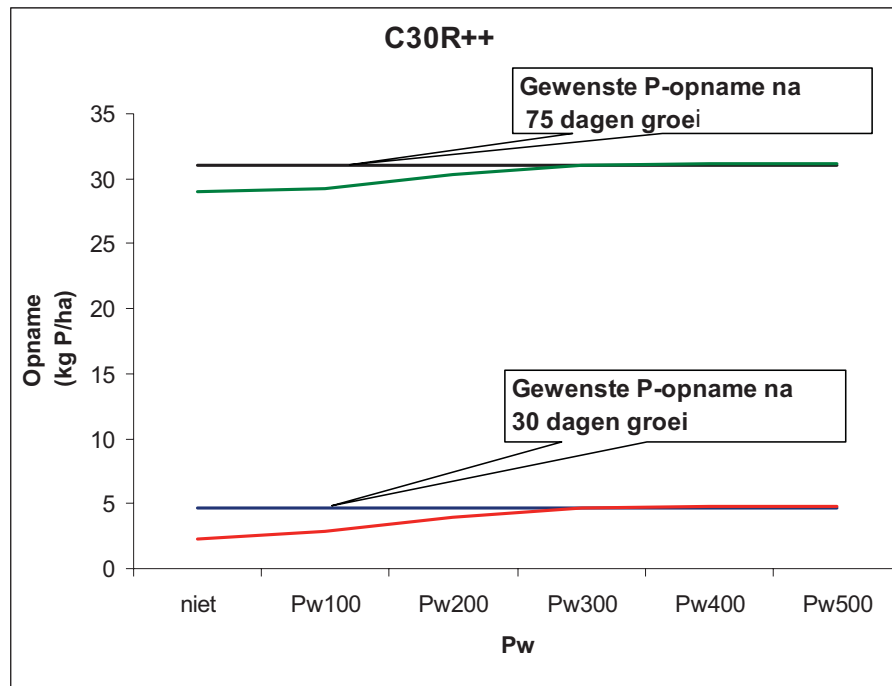
De vraag is nu in hoeverre plaatsing van fosfaat dan mogelijkheden biedt om ophoping te voorkomen.

Het effect van een plaatselijke verhoging van de Pw in 1% van het bouwvoorvolume tot 100, 200, 300, 400 en 500 (de uitgangssituatie is een Pw van 35 in de laag 0-30 cm) is voor het modelgewas C30R++ weergegeven in Figuur 10. Deze figuur maakt duidelijk dat een plaatselijke verhoging tot Pw 300 voor dit gewas voldoende is om de gewenste opname te realiseren, ofschoon op hectarebasis er slechts ca. 6 kg P/ha mee gemoeid is.



*Figuur 9. Gerealiseerde P-opname op 30 (—) en 75 (—) dagen na planten voor modelgewas C10R++ (zie Tabel 2) in afhankelijkheid van de Pw. De horizontale lijnen geven de gewenste P-opname na 30 (onderste) en 75 (bovenste) dagen aan.*

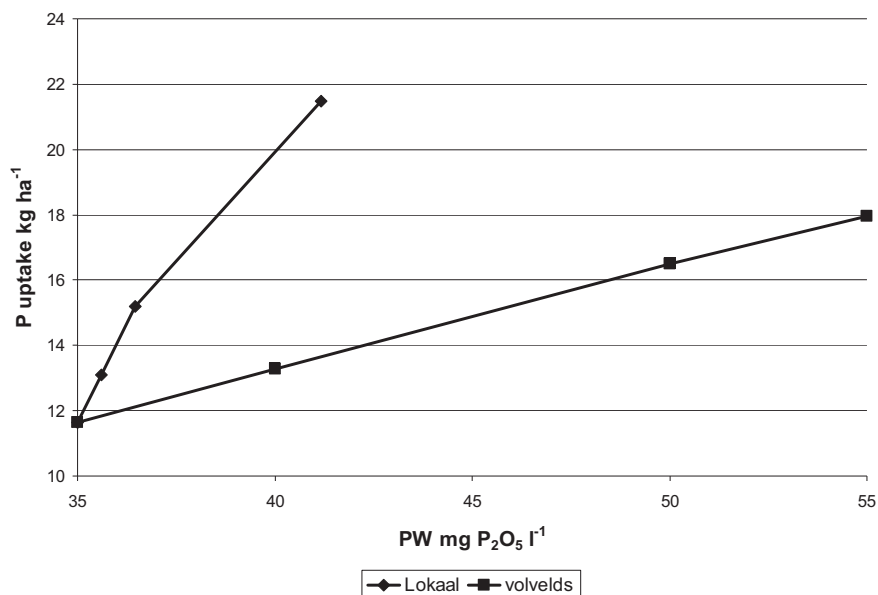
<sup>3</sup> Verklaring van de code C10 (totale P-opname in kg/ha = 10); R++ = matige beworteling; zie ook Tabel 2.



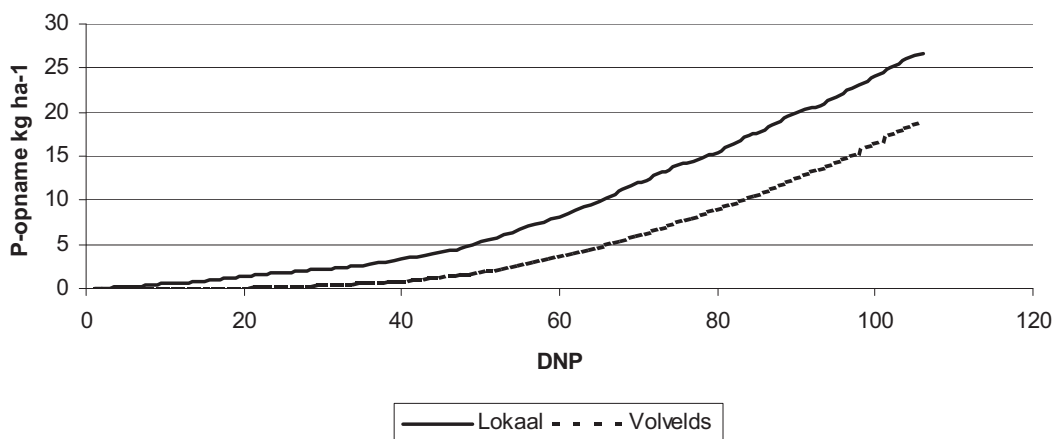
Figuur 10. Effect van plaatsing van P (lokale Pw verhoging tot 100, 200 ...500) op de gerealiseerde P-opname na 30 (—) en 75 (—) dagen. De horizontale lijnen geven de gewenste P-opname na 30 (onderste) en 75 (bovenste) dagen aan.

#### 4.2.5 Efficiëntie van plaatsing

Op hectare basis betekent plaatsing slechts een geringe verhoging van de Pw, genoemde objecten zouden ten opzichte van de uitgangssituatie van Pw 35 leiden tot respectievelijk een Pw van 35.8, 36.5, 37.8, 38 en 39.6, er zijn immers relatief geringe hoeveelheden fosfaat mee gemoeid. In Figuur 11 staat als voorbeeld voor het gewas prei (basismodel) de uiteindelijk opgenomen hoeveelheid P als functie van (dezelfde) gemiddelde uitgangs Pw met en zonder plaatsing. Duidelijk is dat een lokale toediening van P leidt tot een hogere P-opname dan een toediening over het gehele profiel. Dit wordt ook getoond in Figuur 12, waar het verloop van de P-opname bij lokale en volveldstoediening van P (beide leidend tot hetzelfde gemiddelde Pw-getal) wordt weergegeven. Hoewel de snelheid van P-opname op den duur vrijwel gelijk wordt, wordt de achterstand in opname opgelopen in de beginfase bij volveldstoediening niet goedgehaakt.



Figuur 11. P-opname als functie van gemiddelde Pw-getal bij lokale en volvelds toediening.



Figuur 12. Het verloop van de P-opname bij lokale en volvelds toediening in de tijd (DNP = dagen na planten). In beide gevallen bedraagt het initiële Pw-getal 39.5 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per liter grond.

#### 4.2.6 Interactie tussen Pw en plaatsing

In Tabel 5 staan de resultaten voor een aantal modelgewassen waarbij het effect van plaatsing (6.3 kg P/ha) gesimuleerd is bij een verschillende Pw, namelijk 25 of 35. Het effect van plaatsing is beoordeeld na 30 dagen groei door de gerealiseerde opname te vergelijken met de gevraagde opname en dit als percentage uit te drukken (laatste kolom in deze tabel).

De gesimuleerde opname voor gewassen met een opname van 10, 20 en 30 kg P (C10,20, 30) was bij een Pw van 25 veel lager dan de vereiste opname, en zoals te verwachten des te meer naarmate de beworteling geringer en de vereiste opname hoger was. Een verhoging van de Pw van 25 naar 35 had relatief weinig effect, maximaal kon 10% meer van de vereiste opname gerealiseerd worden. Bijvoorbeeld bij modelgewas C20R++ kon bij een Pw van 25 51% van de vereiste opname gerealiseerd worden na 30 dagen. Bij een Pw 35 steeg dit percentage naar 61%. Voor

alle andere gewassen was een dergelijke verbetering zichtbaar, de grootste benutting werd gerealiseerd bij gewas C20R+++ waar bij een Pw van 35 76% van de vereiste opname werd gerealiseerd.

Dat bij een Pw van 35 zonder bemesting niet aan de vereiste opname wordt voldaan is overigens niet in tegenspraak met de huidige P-advisering in Nederland: op gronden met een Pw van 35 wordt voor P-gevoelige gewassen een gift geadviseerd van 68 kg P ha<sup>-1</sup> (155 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

Een veel groter effect gaf een plaatsing van 6 kg P/ha. In alle gevallen kon nu de vereiste opname wel gerealiseerd worden. Zelfs bij modelgewas C30R++ (hoge behoefte, matige beworteling) steeg het aandeel van 40% (Pw25) of 49% (Pw35) naar 100%.

Deze simulatie geeft aan dat in de eerste groeifase de wortellengte een beperkende factor is voor de P-opname (zie ook het effect van toenemende beworteling bij gewas C20). Deze resultaten suggereren dat het plaatsen van fosfaat relatief meer effect geeft dan een verhoging van de bodemvruchtbaarheid voor P. In een klimaatkamerproef die elders verslagen wordt werd dit bevestigd.

Tabel 5. *Het effect van plaatsing (6.3 kg P/ha) en Pw op de gesimuleerde P-opname na 30 dagen voor verschillende modelgewassen die verschillen in totale P-opname (10, 20 en 30 kg P/ha; codes C10, C20 and C30 resp.) en in bewortelingskarakteristiek (zwak (R+), matig (R++) of sterk (R+++)).*

Model-gewas	Totale P Opname <sup>1</sup>	Beworteling <sup>2</sup>	Pw <sup>3</sup>	Plaatsing kg P/ha <sup>4</sup>	P opname na 30 dagen		
					Vraag	Gerealiseerd	% van de vraag
C10R+	10	+	25	0	1.5	0.8	53%
C10R+	10	+	25	6.3	1.5	1.6	101%
C10R+	10	+	35	0	1.5	1.0	62%
C10R+	10	+	35	6.3	1.5	1.6	101%
C20R+++	20	+++	25	0	3.1	2.1	67%
C20R+++	20	+++	25	6.3	3.1	3.2	101%
C20R+++	20	+++	35	0	3.1	2.4	76%
C20R+++	20	+++	35	6.3	3.1	3.2	101%
C20R++	20	++	25	0	3.1	1.6	51%
C20R++	20	++	25	6.3	3.1	3.2	102%
C20R++	20	++	35	0	3.1	1.9	61%
C20R++	20	++	35	6.3	3.1	3.2	102%
C20R+	20	+	25	0	3.1	1.1	33%
C20R+	20	+	25	6.3	3.1	3.2	102%
C20R+	20	+	35	0	3.1	1.4	44%
C20R+	20	+	35	6.3	3.1	3.2	102%
C30R++	30	++	25	0	4.7	1.9	40%
C30R++	30	++	25	6.3	4.7	4.8	101%
C30R++	30	++	35	0	4.7	2.3	49%
C30R++	30	++	35	6.3	4.7	4.7	99%

<sup>1</sup> Totale P-opname na 75 dagen groei.

<sup>2</sup> Wortellengtedichtheid na 30 dagen groei was resp. 0.43, 0.84 and 1.72 cm. cm<sup>3</sup> voor R+, R++ and R+++.

<sup>3</sup> Pw = mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> L<sup>-1</sup> na extractie in een 1:60 v/v ratio grond: water oplossing.

<sup>4</sup> Plaatsing is gedaan in 1% van het bouwvoervolume.

#### 4.2.7 Overige resultaten

Een lokale verhoging naar PW500 (ca. 10 kg P/ha) was voor modelgewassen met een hoge P-opname altijd voldoende om bij Pw 35 én Pw 25 de gewenste P-opname te realiseren. Bij een geringere verhoging (naar Pw 300) kon bij Pw 25 de opname na 30 dagen nog wel gerealiseerd worden, maar na 75 dagen was dit soms niet het geval. Dit geeft aan dat bij lagere Pw's plaatsing voor deze gewassen (hoge opname) niet altijd soelaas zal kunnen bieden. Er is ook gekeken of een bemesting van 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (mogelijk de gewasnorm in 2015) in de vorm van plaatsing altijd voldoende is. Hierbij is de plaatsing toegepast in 5% van het bouwvoorvolume in plaats van in 1%. Onder alle omstandigheden (modelgewassen + Pw) kan volgens het model dan de gewenste opname gerealiseerd worden. In bovenstaande berekeningen is altijd gebruik gemaakt van de adsorptieisotherm van Meterik. Als de (ongunstiger) adsorptieisotherm van Horst echter gebruikt werd dan waren de resultaten minder gunstig.

#### 4.2.8 Kanttekeningen bij de resultaten

Voor wat betreft de betrouwbaarheid van bovenstaande conclusies zijn nog de volgende kanttekeningen te plaatsen:

- De onzekerheden van het model met betrekking tot bewortelingsverloop en nutriëntenopname onmiddellijk na planten. Weinig gegevens zijn voor deze periode beschikbaar terwijl ook weinig gegevens beschikbaar zijn van startwaarden (bijvoorbeeld de wortellengte) bij planten. In het model is dit een vrij gevoelige parameter die de resultaten sterk beïnvloedt. Hetzelfde geldt voor de P-opname in de tijd onmiddellijk na planten
- Zoals al vermeld kan de gebruikte adsorptie-isotherm de resultaten sterk beïnvloeden
- De aanname dat alle wortellengtes even effectief zijn is wellicht te optimistisch
- De aanname dat er constante optimale omstandigheden voor opname zijn
- De aanname dat alle P beschikbaar is (geen fixatie e.d.)
- Planten die met kluit geplant worden zouden in principe over meer P kunnen beschikken, nu wordt impliciet aangenomen dat de kluitplant/perspot een Pw van 35 heeft.

## 5. Discussie

Uitkomsten van modellen moeten altijd getoetst worden aan de werkelijkheid. De kanttekeningen waarmee het vorige hoofdstuk geëindigd is geven al aan dat er veel onzekerheden zijn bij de interpretatie van modeluitkomsten. Daarom zullen we ons in deze discussie beperken tot de grote lijnen, in een volgende rapportage worden de modeluitkomsten vergeleken met de uitkomsten van proeven.

Bij de gewassen met een langere groeidiur is aangenomen dat het wortelstelsel vooral in de lineaire fase van de groei van belang is. Gewassen met een hoge P-opname zijn dan gebaat bij een investering van droge stof in een intensieve beworteling. Voorbeelden zijn koolzaad, granen e.d. In die gevallen kan dan ook, ondanks een hoge afvoer, worden volstaan met een relatief lage P-bemesting.

De analyse voor de 'lineaire' gewassen, waarbij modeluitkomsten werden vergeleken met het huidige P-advies, gaf een redelijke overeenkomst aan. Bij de huidige advisering wordt vanaf een bepaalde Pw geen bemesting meer gegeven. De modeluitkomsten gaven aan dat deze Pw voor enkele gewassen lager zou kunnen liggen (bijvoorbeeld zomergerst, snijmaïs en spruitkool) terwijl bij het gewas prei de modeluitkomsten juist een omgekeerd beeld gaven. Bij het huidige advies is hier vanaf Pw 30 geen bemesting meer nodig, terwijl modelberekeningen suggereerden dat dit eerst vanaf Pw 55 het geval zou zijn.

Bij de tweede groep gewassen, veelal snel groeiende gewassen die in volle groei geoogst worden, toonden de simulatieberekeningen aan dat het gericht plaatsen van fosfaat een veel groter effect heeft dan het verhogen van de Pw van de grond, in dit geval van Pw 25 naar Pw 35. Om zelfs binnen het streeftraject de Pw te verhogen kost afgaande op de adviesbasis veel fosfaat, terwijl de berekeningen aangaven dat met relatief geringe hoeveelheden P (5- 10 kg P/ha) een zelfde effect kan worden bereikt. Recent gaf Römer (2009) aan dat ook bij het in Duitsland gehanteerde streeftraject er meer dan 500 kg P/ha (1350 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) nodig is om de P-status van de grond van het laagste naar het hoogste niveau te brengen. Dit is een hoeveelheid die gewassen pas na 20 jaar afgevoerd hebben, Römer deed de suggestie om, rekening houdend met de oplopende prijs en de eindigheid van fosfaatvoorraden, het gehanteerde P-adviesstelsel kritisch te heroverwegen.

Vooraf bij een hoge vruchtbaarheidstoestand van de grond zouden kleine geplaatste hoeveelheden kunnen voorkomen dat een nog verdere fosfaataccumulatie optreedt, terwijl opbrengst en kwaliteit behouden blijven.

In paragraaf 2.2 werd de vraag gesteld of de relatief hoge adviezen bij sommige gewassen nodig zijn om slechts een relatief korte periode te overbruggen. Dit werd in grote lijnen door de simulatieberekeningen bevestigd, evenals het gegeven dat het wortelstelsel, voor wat betreft de fosfaatopname, vooral in de eerste groeifasen heel effectief moet zijn. De fosfaatopname was vlak na zaaien/planten groter, mits uitgedrukt per cm wortel, dan later in het seizoen (Figuur 8).

Tot slot kan nog genoemd worden dat technische ontwikkelingen in het kader van precisielandbouw plaatsing van fosfaat als strategie kunnen stimuleren en vervolmaken. Bij goed functionerende GPS systemen (plaatsbepaling) kan zaaien/planten en toediening in de tijd ontkoppeld worden, hierdoor komt ook plaatsing van organische mest meer binnen bereik. Ook het toedienen van P-oplossingen met behulp van de Pulstec techniek (firma Agritechnics) kan de mogelijkheden verruimen om na zaaien of planten plaatsing toe te passen.

Als nog extremere vorm van plaatsing kan tenslotte het coaten van zaden met nutriënten beschouwd worden, voor maïs is dat nu al commercieel verkrijgbaar (Iseed). Wellicht kunnen kleine hoeveelheden fosfaat aangebracht op de zaadhuid ook voor verschillende groentegewassen er toe bijdragen dat de eerste groeifase, waarin de wortellengete beperkend is, wordt overbrugd.

Het geheel overziend lijkt plaatsing van fosfaat een strategie die van belang kan zijn om het uiteindelijke doel (evenwichtsbemesting) te realiseren. Deze conclusie is gebaseerd op modelberekeningen. Om na te gaan of de berekende effecten ook optreden in werkelijkheid zijn experimenten gedaan in klimaatkamers en in het veld. Deze worden besproken in een volgend rapport.





## 6. Literatuur

- Anonymus, 2005.  
Mestbeleid 2005: Tabellen. Dienst Regelingen, Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit 28 pp.
- Anonymus, 2009.  
Vierde Nederlandse Actieprogramma betreffende de Nitraatrichtlijn (2010-2013). 50 pp. Ministerie van LNV
- Asperen, P. v., J.J. Schröder & F.G. Wijnands, 1995.  
FARM-A 1.0: een analysesysteem voor de bedrijfsvoering : ontwikkeld ten behoeve van het project 'Introductie Geïntegreerde Akkerbouw'; DI. 1: Gebruikershandleiding DI. 2: Achterliggende rekenregels en analysecondities DI. 3: Methode van programmeren en listingtabellen. Rapport / Instituut voor Agrobiologisch en Bodemvruchtbaarheidsonderzoek (AB-DLO) (47-49)
- Booij, R., A.D.H. Kreuzer, A.L. Smit & A. v.d. Werf, 1996.  
Effect of nitrogen availability on dry matter production, nitrogen uptake and light interception of Brussels sprouts and leeks. *Netherlands Journal agricultural Science* 44: 3-19.
- De Willigen, P. & M. Heinen, 2001.  
P-adsorption and P-fixation in FUSSIM2. IN (eds.) M. Heinen & P. De Willigen. FUSSIM2 version 5. New features and updated user's guide. p. 65-75.
- De Willigen, P., M. Heinen, A. Mollier & M. van Noordwijk, 2002.  
Two-dimensional growth of a root system modelled as a diffusion process. I. Analytical solutions. *Plant and Soil* 240(2): 225-234.
- De Willigen, P. & M. van Noordwijk, 1987.  
Roots, plant production and nutrient use efficiency. PhD thesis LU Wageningen, 282 pp.
- De Wit, C.T., 1961.  
Space relationships within populations of one or more species. . Mededeling / Instituut voor biologisch en scheikundig onderzoek van landbouwgewassen ) no. 147(OF: Overdr. Symposia of the society for experimental biology, 15(1961)314-329).
- Djodjic, F., L. Bergstrom & C. Grant, 2005.  
Phosphorus management in balanced agricultural systems. *Soil Use and Management* 21(Suppl. 1): 94-101.
- Ehlert, P.A.I. & C.A.P. van Wijk, 2002.  
Fosfaatbehoefte van vollegrondsgroentegewassen 2. Plaatsing in gewasgroepen. PPO-Projectrapport nr. 1125232: 46 pp.
- Ehlert, P.A.I., C.A.P. v. Wijk & P. de Willigen, 2002.  
Fosfaatbehoefte van vollegrondsgroentegewassen 3. Precisiebemesting. PPO-Projectrapport nr. 1125232: 27pp.
- Ehlert, P.A.I., 2000.  
Fosfaatbehoefte van vollegrondsgroentegewassen 1. Bemesting en rendement. Projectrapport 25.2.32. PAV, Lelystad.
- Goudriaan, J. & J.L. Monteith, 1990.  
A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. *Annals of Botany* 66(6): 695-702.
- Heinen, M. & P. de Willigen, 2001.  
Fussim2 version 5: new features and updated user's guide. Wageningen, Alterra Research Instituut voor de Groene Ruimte: 164.
- Heinen, M., A. Mollier & P. de Willigen, 2003.  
Growth of a root system described as diffusion. II. Numerical model and application. *Plant and Soil* 252(2): 251-265.
- Ittersum, M.K. v., P.A. Leffelaar & H. v. Keulen, 2003.  
Developments in modelling crop growth, cropping systems and production systems in the Wageningen School. *European Journal of Agronomy* 18: 201-234.
- Kropff, M.J. & H.H. v. Laar, 1993.  
Modelling crop-weed interactions CAB International, Wallingford, 274 pp.

- Ma, C.H., 1999-2004.  
Starter solutions technology. Progress Reports 1998-2003. Asian Vegetable Research and Development Center (AVRDC), Shanhua, Taiwan.
- Ma, C.H. & T. Kalb, 2006.  
Development of Starter Solution Technology as a Balanced Fertilization Practice in Vegetable Production. Acta Horticultura 700: 167-172 (Proc. ISHS Towards Ecologically Sound Fertilisation Strategies for Field Vegetable Production. Perugia 2005. Eds. F. Tei, P. Benincasa and M. Guiducci).
- Noordwijk, M. v., P. de Willigen & P.A.I. Ehlert, 1990.  
A simple model of P uptake by crops as a possible basis for P fertilizer recommendations. Netherlands Journal of Agricultural Science 38(3a): 317-322.
- Plénet, D., S. Etchebest, A. Mollier & S. Pellerin, 2000.  
Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency: I. Leaf Growth. Plant and Soil 223(1-2): 117-130.
- Pronk, A.A., M. Heinen & H. Challa, 2005.  
Dry mass production and water use of *Thuja occidentalis* 'Brabant': field experiments and modeling. Plant and Soil 268: 329-347.
- Prummel, J. & P.A. v. Barnau Sijthoff, 1975.  
Rijenbemesting met fosfaat bij stamslabonen en tuinbonen. Bedrijfsontwikkeling 6: 173-175.
- Römer, V.W., 2009.  
Concepts for a more efficient use of phosphorus based on experimental observations (Ansätze für eine effizientere Nutzung des Phosphors auf der Basis experimenteller Befunde). Berichte über Landwirtschaft 87(1): 5-30.
- Smit, A.L., P. Bindraban, J.J. Schröder, J.G. Conijn & H.G. v.d. Meer, 2009.  
Phosphorus in agriculture: global resources, trends and developments. Plant Research International (Report 282): 36 pp.
- Smit, A.L. & A. van der Werf, 1992.  
Fysiologie van stikstofopname en -benutting : gewas- en bewortelingskarakteristieken. Agrobiologische Thema's 6, Stikstofstromen in agro ecosystemen. H.G. van der Meer & J.H.J. Spiertz (eds). CABO DLO Wageningen.
- Steen, I., 1998.  
Phosphorus availability in the 21st century: management of a non-renewable resource. Phosphorus & Potassium (September-October) : 217.
- Stone, D.A., 1998.  
The effects of 'starter' fertilizer injection on the growth and yield of drilled vegetable crops in relation to soil nutrient status. Journal of Horticultural Science and Biotechnology 73(4): 441-451.
- Stone, D.A., 2000.  
The effects of starter fertilizers on the growth and nitrogen use efficiency of onion and lettuce. Soil Use and Management 16(1): 42-48.
- Stone, D.A., 2000.  
Nitrogen requirement of wide-spaced row crops in the presence of starter fertilizer. Soil Use and Management 16(4): 285-292.
- Van Dijk, W., 2003.  
Adviesbasis voor de bemesting van akkerbouw- en vollegrondsgroentengewassen. PPO-publicatie nr. 307, 66 pp, 8 bijlagen.

# Bijlage I.

## Modelbeschrijving

### *Beschrijving van de gewasgroei, de drogestofverdeling en de N- en P-vraag*

De drogestoftoename wordt berekend uit weersgegevens (straling (DTR), temperatuur), de LAI (Leaf Area Index), de fractie onderschept licht (Fint) en LUE:

$$\frac{dW}{dt} = DTR * F_{int} * LAI * LUE . \quad (1)$$

Voor een korte beschrijving van LINTUL-type modellen wordt verwezen naar van Ittersum *et al.* (2003). De drogestof wordt vervolgens over de diverse organen verdeeld volgens temperatuur afhankelijke verdelingsfuncties. De drogestof die aan de bladeren wordt toebedeeld, wordt omgezet in nieuwe bladmassa met behulp van het specifiek bladoppervlak (SLA).

De vraag naar stikstof (N) wordt verkregen door de drogestoftoename van blad, stengel en wortel te vermenigvuldigen met het optimum N-gehalte voor het betreffende orgaan. Dit gehalte is afhankelijk verondersteld van de temperatuursom (Figuur 13). In het model is de fosforvraag (P-vraag) op 1/8 van de N-vraag gesteld.

### *Beschrijving bodemprocessen*

FussimR berekent de waterbalans in de niet verzadigde zone op basis van de Richard-vergelijking (Heinen & De Willigen, 1998). In de verzadigde zone wordt de wet van Darcy gebruikt. Voor een gedetailleerde beschrijving van FussimR wordt verwezen naar Heinen & De Willigen (2001).

Het bovengronds gewasgroeiemodel berekent hoeveel drogestof er aan de wortels wordt toegekend. FussimR berekent vervolgens de verspreiding van de wortels door het profiel. Hierbij wordt de drogestof omgerekend in wortellengte. Allereerst wordt de specifieke wortellengte berekend volgens:

$$SRL = \frac{1}{\pi R_0^2 \rho} \quad (2)$$

waarin SRL de specifieke wortellengte is (cm wortel per g drooggewicht wortel),  $R_0$  de wortelstraal (cm), en  $\rho$  het drogestofgehalte van de wortel. Aangenomen is dat 1 cm<sup>3</sup> wortel overeenkomt met 1 gram versgewicht. De toename in wortellengte L kan dan berekend worden uit de toename in wortelgewicht G met:

$$\Delta L = SRL * \Delta G \quad (3)$$

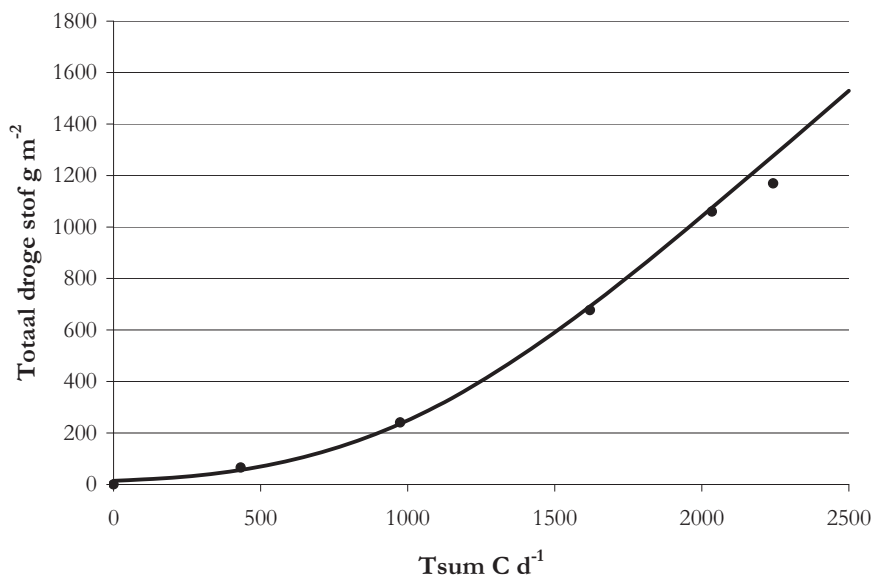
De start van de toename van de wortellengte wordt toegekend aan dat bodemcompartiment waarin zich de onderkant van de plant bevindt, d.w.z. in de binnenste ring in de cilinder in de laag 10-15 cm. Van daaruit verspreiden de wortels zich door het profiel. De verspreiding van wortels door het profiel wordt beschreven door een diffusieproces (De Willigen *et al.*, 2002).

De opname van water en nutriënten door de wortels wordt berekend in navolging van De Willigen & Van Noordwijk (1987).

In het model wordt aangenomen dat de beschikbare hoeveelheid fosfaat in de bodem uit twee fracties bestaat: de in de bodemoplossing opgeloste fosfaat en het aan vaste bodembestanddelen geadsorbeerde fosfaat (De Willigen & Heinen, 2001). De relatie tussen beiden wordt gegeven door de adsorptie-isotherm, een zogenaamde Langmuir isotherm die de vorm heeft:

$$Q = \frac{kQ_{\max}C}{1+kC} \tag{4}$$

waarin  $Q$  de geadsorbeerde hoeveelheid is ( $\text{mg cm}^{-3}$ ),  $C$  de concentratie van P in de bodemoplossing ( $\text{mg ml}^{-1}$ ),  $Q_{\max}$  het adsorptiemaximum ( $\text{mg cm}^{-3}$ ), en  $k$  de Langmuirparameter ( $\text{ml mg}^{-1}$ ).



Figuur 13. Verloop van de totale drogestof met de temperatuursom zoals voor een preigewas gemeten in 1992 (●) door Booij et al. (1996) en vereffend op een expolineaire curve (—).

## Bijlage II.

# Modelkalibratie en initiatie

### Drogestofproductie en -verdeling

Het bovengrondse gewasgroei-model voor prei is gekalibreerd met gegevens van Booij *et al.* (1996). Booij *et al.* hebben in 1992 de drogestofproductie en de verdeling over blad (levend en dood), stengel en wortel van een preigewas op vijf tijdstippen in het groeiseizoen bepaald. Door de meetpunten is een expolineaire functie berekend van de vorm (Goudriaan & Monteith, 1990):

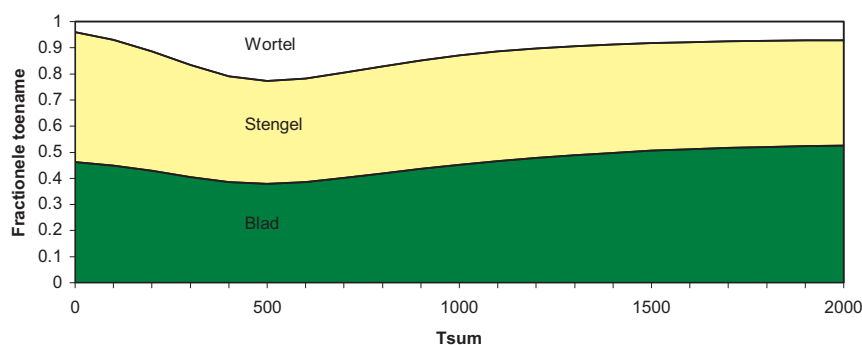
$$y = \frac{c_m}{r_m} \ln \left[ 1 + \exp(r_m \tau) \left( \exp\left(\frac{r_m y_0}{c_m}\right) - 1 \right) \right] \quad (2)$$

waarin  $y$  de drogestofopbrengst van het betreffende gewasonderdeel is ( $\text{g m}^{-2}$ ),  $\tau$  de temperatuursom ( $^{\circ}\text{C d}$ ),  $y_0$  de initiële drogestof ( $\text{g m}^{-2}$ ),  $c_m$  de groeisnelheid voor grote waarden van  $\tau$  ( $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ), en  $r_m$  de relatieve groeisnelheid bij lage waarden van  $\tau$  ( $\text{d}^{-1}$ ). Een voorbeeld wordt gegeven in Tabel 6. De gekalibreerde waarde van de parameters staan in Tabel 7.

Tabel 6. De waarde van de parameters van de expolineaire curve voor de onderscheiden plantendelen gebaseerd op gegevens van Booij *et al.* (1996).

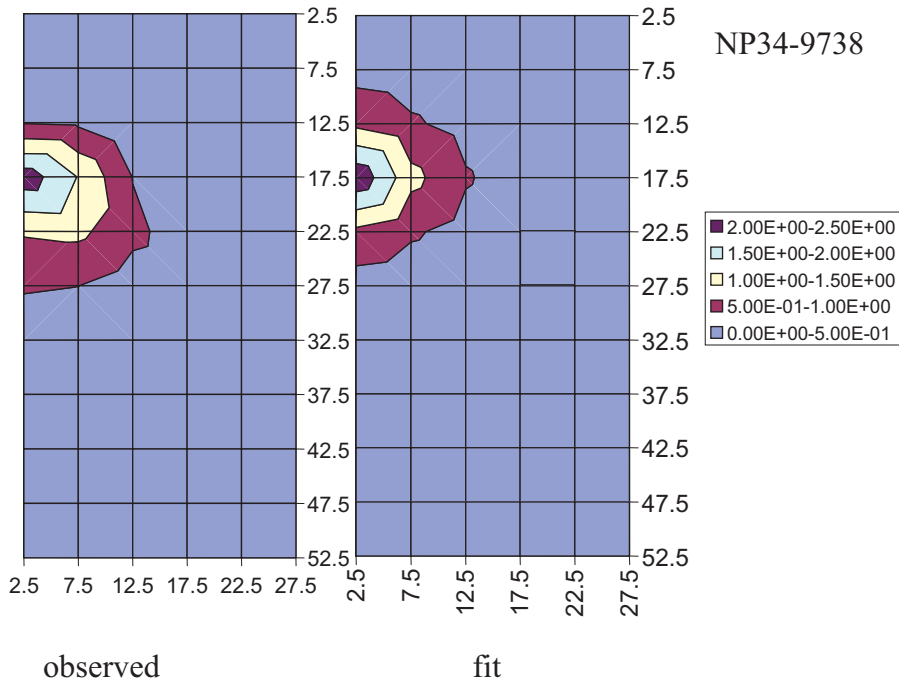
Parameter	Eenheid	Blad	Stengel	Wortel	Totaal
$c_m$	$\text{g m}^{-2} (^{\circ}\text{C d})^{-1}$	0.354	0.400	0.067	0.831
$r_m$	$(^{\circ}\text{C d})^{-1}$	$2.99 \cdot 10^{-3}$	$3.04 \cdot 10^{-3}$	$9.01 \cdot 10^{-3}$	$3.45 \cdot 10^{-3}$
$y_0$	$\text{g m}^{-2}$	6.93	7.38	0.2	14.3

Door vergelijking 2 te differentiëren naar  $\tau$  vindt men de drogestoftoename per eenheid temperatuursom en kan de fractie verdeling van de totale drogestoftoename over die van blad, stengel en wortel en de relatieve sterfte van het blad berekend worden. Figuur 14 geeft de verdeling van de drogestof toename over blad, stengel en wortel.



Figuur 14. Verdeling van de drogestoftoename over de toename van blad, stengel en wortel.

De parameters, de diffusiecoëfficiënten in de radiale en verticale richting, zijn ontleend aan naaldenplankgegevens d.m.v. een vereffeningsprocedure als beschreven in Heinen *et al.* (2003). Figuur 15 toont de resultaten, in Tabel 7 staan de parameterwaarden.



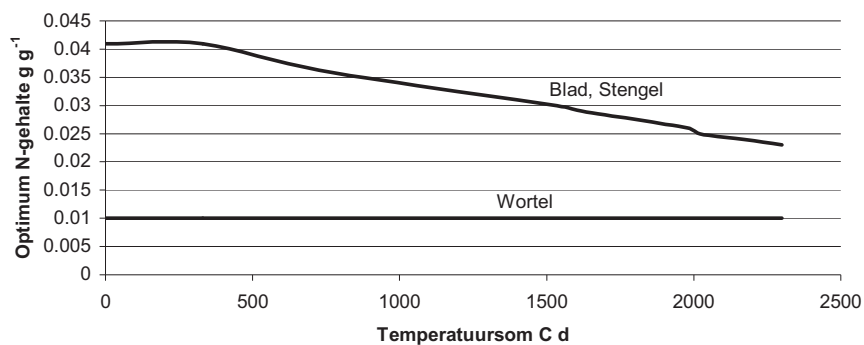
Figuur 15. Gemeten verdeling van de verspreiding van een prei wortelstelsel 28 dagen na planten, en een met het worteldiffusiemodel berekende verspreiding van het wortelstelsel.

Tabel 7. De waarden van de gebruikte wortelparameters.

Naam	Symbool	Eenheid	Waarde
Straal	$R_0$	cm	0.03
Drogestofgehalte	$\rho$	g g <sup>-1</sup>	0.08
Diffusiecoëfficiënt radiaal	$D_R$	cm <sup>2</sup> d	3.47
Diffusiecoëfficiënt verticaal	$D_z$	cm <sup>2</sup> d	1.33

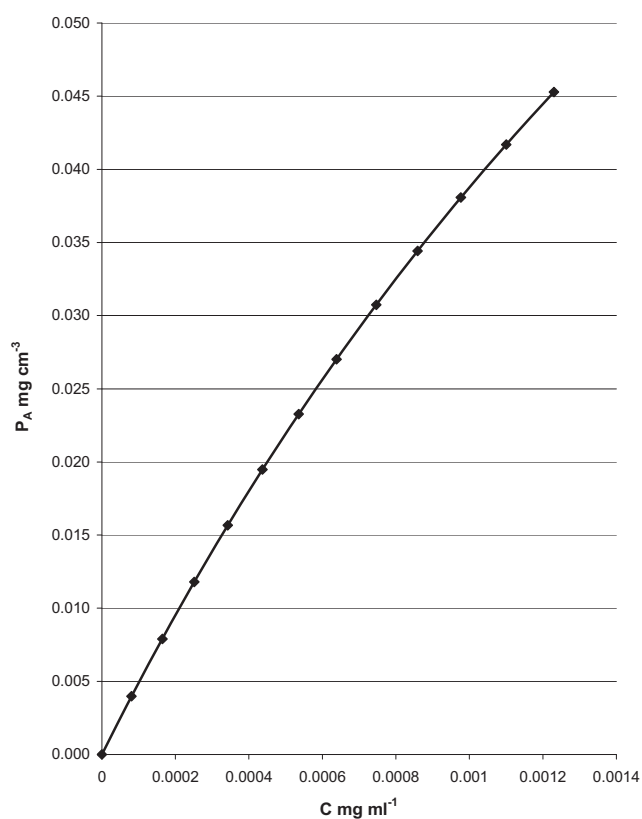
**Stikstof- en fosforopname.**

De gegevens van Booij *et al.* (1996) zijn tevens gebruikt om de N-vraag van het bovengrondse gewas te berekenen. In Figuur 16 is het verloop van het optimale (gemeten) N-gehalte van de drogestoftoename uitgezet tegen de temperatuursom. Dit zijn tevens de waarden zoals deze in het model gebruikt zijn. Voor het optimale N-gehalte van de wortels is een standaard waarde van 1% opgelegd.



Figuur 16. Verloop van het optimum N-gehalte met de temperatuursom, gebaseerd op gegevens van Booij et al. (1996).

In Figuur 17 is de gebruikte adsorptie-isotherm afgebeeld. Het betreft de P-adsorptie isotherm van het proefveld in Meterik (Ehlert, pers. com.).



Figuur 17. Fosfaatadsorptie-isotherm van de zandgrond Meterikse veld. De adsorptieparameters zijn:  $k = 300 \text{ ml mg}^{-1}$ ,  $Q_{\text{max}} = 0.168 \text{ mg cm}^{-3}$ . Het getoonde traject komt overeen met een Pw traject van 0.60 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per liter grond.

## Modelinitiatie

### *Bovengrondse model*

De initiële waarden voor de verschillende gewasonderdelen in de modelberekeningen zijn de waarden uit Tabel 6 voor  $y_{0i}$  gecorrigeerd voor het verschil in plantdichtheid (11,9 m<sup>2</sup> in de experimenten naar 17 m<sup>2</sup> in de modelberekeningen).

### *Bodemmodel*

Dezelfde bodemkarakteristieken tot een laag van 70 cm zijn gebruikt als door Pronk *et al.* (2005). Het vochtgehalte is constant gehouden tijdens de berekeningen, zowel in de tijd als over het gehele profiel. Deze z.g.n. steady state bedroeg 0,3 ml cm<sup>-3</sup>.

Het stikstofaanbod (de initiële voorraad in de bodem) is zodanig gekozen dat geen stikstoftekort optreedt: de actuele opname is altijd gelijk aan de vraag.

### *Simulatieperiode en weer*

De totale simulatieperiode bedroeg 105 dagen, de planttijd was 30 mei en geoogst werd op 12 september. De gebruikte weersgegevens zijn die zoals gemeten in Wageningen in 1996.

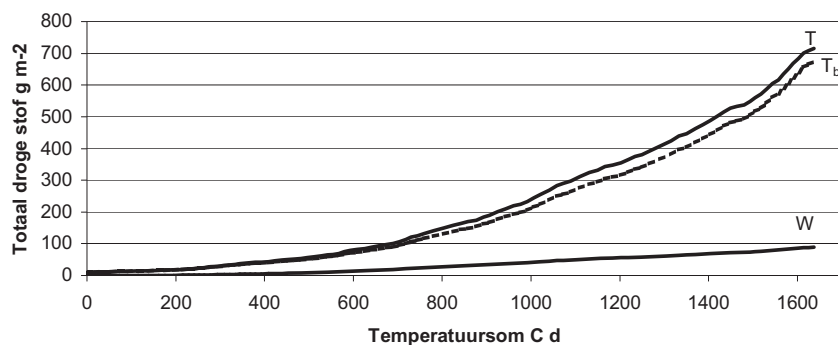


## Bijlage III.

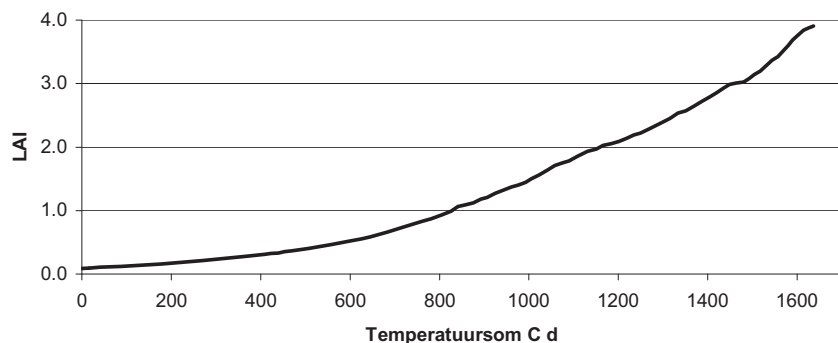
# Modelvalidatie

### Potentiële groei

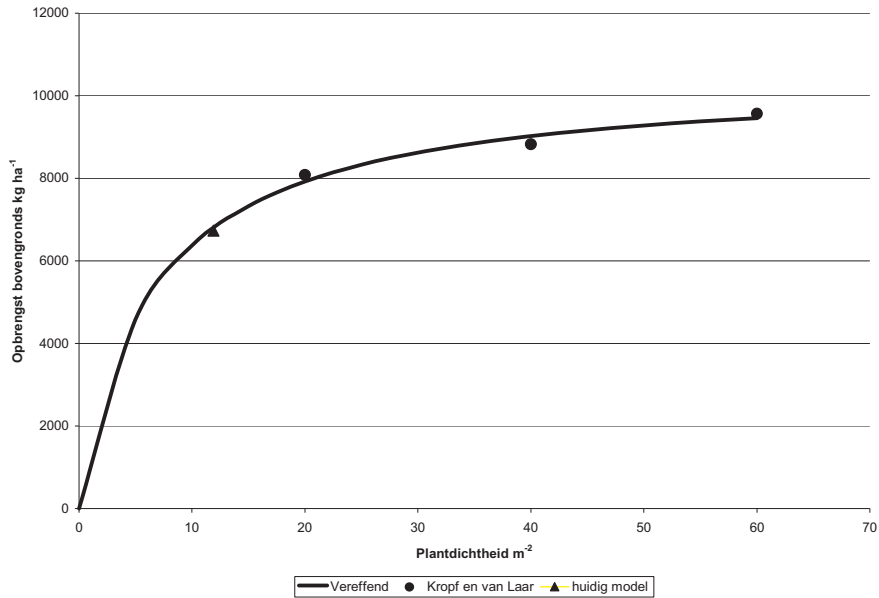
De resultaten van het preimodel dat als basis genomen is in de berekeningen is gevalideerd met externe gegevens. De totale hoeveelheid drogestof ( $T$ ), de hoeveelheid bovengrondse ( $T_b$ ) en ondergrondse ( $W$ ) drogestof neemt toe bij een toenemende temperatuursom (Figuur 18). Ook de leaf area index ( $LAI$ ) neemt toe bij een toenemende temperatuursom (Figuur 19). In Figuur 20 worden de uiteindelijke totaalopbrengst vergeleken met experimentele resultaten van (Kropff & Laar, 1993). Omdat deze betrekking hebben op veel hogere plantdichtheden is een rechtstreekse vergelijking niet mogelijk. Volgens (De Wit, 1961) wordt het verband tussen plantdichtheid en opbrengst gegeven door een orthogonale hyperbool van de vorm zoals gegeven in vergelijking (2). Door de drie experimentele punten en het punt (0,0) is de best passende orthogonale hyperbool berekend. De gesimuleerde opbrengst past goed in de curve (Figuur 20).



Figuur 18. De totale drogestofproductie en drogestofverdeling als functie van de temperatuursom,  $T$  is de totale productie,  $T_b$  en  $W$  geeft de wortelproductie aan.



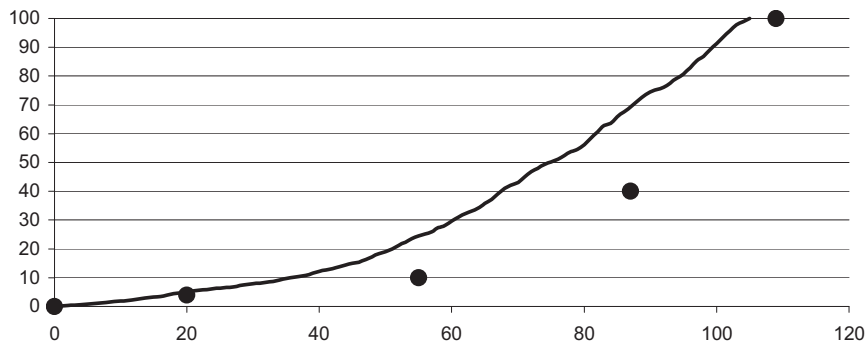
Figuur 19. De ontwikkeling van de leaf area index (LAI) als functie van de temperatuursom.



Figuur 20. De drogestofopbrengst als functie van plantdichtheid.

## P-opname

Ehlert & Van Wijk (2002) geven een figuur met het procentuele verloop van de P-opname in de tijd. In Figuur 21 zijn deze resultaten weergegeven samen met de modelresultaten. Het verloop van de P-opname is vergelijkbaar maar de in deze studie berekende opname loopt wat voor op de opname van Ehlert & Van Wijk.



Figuur 21. Het verloop van de cumulatieve P-opname in procenten van de uiteindelijke opgenomen P als functie van de tijd. De punten geven de resultaten van Ehlert & Van Wijk (2002), de curve geeft de resultaten van het model.